

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

დავითი ჯიჯურიძე

უსადენო სენსორული ქსელის ოპტიმიზაცია მისი უმტყუნო
მუშაობის უზრუნველსაყოფად

წარმოდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

სადოქტორო პროგრამა: ციფრული სატელეკომუნიკაციო ტექნოლოგიები
შიფრი: 0714

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი
თბილისი, 0166, საქართველო
ივლისი, 2021 წელი

საავტორო უფლება © 2021 წელი, დავითი ჯიჯურიძე

თბილისი
2021 წელი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი
ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერნი ვადასტურებთ, რომ გავცანით დავითი ჯიჯურიძის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: „**უსადენო სენსორული ქსელის ოპტიმიზაცია მისი უმტყუნო მუშაობის უზრუნველსაყოფად**“ და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

....., 2021 წელი

ხელმძღვანელი ----- პროფესორი ჯ. ბერიძე

რეცენზენტი -----

რეცენზენტი -----

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2021

ავტორი: დავითი ჯიჯურიძე

თემის დასახელება: „უსადენო სენსორული ქსელის ოპტიმიზაცია მისი უმტყუვნო მუშაობის უზრუნველსაყოფად“

ფაკულტეტი: ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის

სადოქტორო პროგრამა: „ციფრული სატელეკომუნიკაციო ტექნოლოგიები“

ხარისხი: აკადემიური დოქტორი

სხდომა ჩატარდა: ივლისი, 2021 წელი

ინდივიდუალური პიროვნებების ან ინსტიტუტების მიერ ზემოთ მოყვანილი დასახელების დისერტაციის გაცნობის მიზნით მოთხოვნის შემთხვევაში მისი არაკომერციული მიზნებით კოპირებისა და გავრცელების უფლება მინიჭებული აქვს საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტს.

ავტორის ხელმოწერა

ავტორი ინარჩუნებს დანარჩენ საგამომცემლო უფლებებს და არც მთლიანი ნაშრომის და არც მისი ცალკეული კომპონენტების გადაბეჭდვა ან სხვა რაიმე მეთოდით რეპროდუქცია დაუშვებელია ავტორის წერილობითი ნებართვის გარეშე.

ავტორი ირწმუნება, რომ ნაშრომში გამოყენებული საავტორო უფლებებით დაცულ მასალებზე მიღებულია შესაბამისი ნებართვა (გარდა იმ მცირე ზომის ციტატებისა, რომლებიც მოითხოვენ მხოლოდ სპეციფიურ მიმართებას ლიტერატურის ციტირებაში, როგორც ეს მიღებულია სამეცნიერო ნაშრომების შესრულებისას) და ყველა მათგანზე იღებს პასუხისმგებლობას.

რეზიუმე

ინტერნეტის განვითარებამ და ინფორმაციული ტექნოლოგიებისა და კავშირგაბმულობის დაახლოებამ მიგვიყვანა ახალი ტექნოლოგიის შექმნამდე და გზა გაუხსნა მომავლის ტექნოლოგიების განვითარებას რომელიც თავისთავში მოიცავს მინიატურული ქსელებს სახელწოდებით სენსორულ ქსელებს. სენსორული ქსელი შედგება მინიატურული მოწყობილობებისაგან დასახელებით სენსორული კვანძები. თითოეულ სენსორულ კვანძს აქვს შეზღუდული ენერგეტიკული და გამოთვლითი რესურსი. უსადენო ინტერფეისის მქონე სენსორული კვანძები ერთმანეთთან კავშირით აფორმირებენ სენსორულ ქსელს. ერთმანეთთან კავშირის განსახორციელებლად სენსორული კვანძები იყენებენ პროტოკოლების სტეკს. სენსორულ ქსელის პროტოკოლების სტეკი შედგება პროგრამული დონისაგან, სატრანსპორტო დონისაგან, ქსელური დონისაგან, მონაცემთა დონისაგან, ფიზიკური დონისაგან და სხვა დონეთ შორისი პროტოკოლებისაგან. სენსორული ქსელი შედგება მინიატურული და დაბალი ღირებულების მოწყობილობებისაგან. სენსორული კვანძების საშუალებით შესაძლებელია, გარკვეული ადგილის დისტანციური მონიტორინგი განხორციელდეს და შეგროვებული მონაცემები აიტვირთოს დისტანციურ მონაცემთა შემნახველში. სენსორულ კვანძებს შეუძლიათ გაზომონ ფიზიკური გარემოს მახასიათებლები როგორცაა ტენი, ხმა, ტემპერატურა, წნევა, ვიბრაცია, გარემოს ქიმიური შემადგენლობა და ა.შ. ტექნოლოგიური წინსვლა იწვევს სენსორული კვანძების ფასის, ზომის, ენერჯის მოხმარების შემცირებას და ამავე დროულად მისი საერთო წარმადობის გაზრდას. სენსორული კვანძები შეგროვებულ ინფორმაციას დასამუშავებლად ცენტრალურ სადგურს უგზავნიან. სენსორული კვანძები მკაცრად არიან შეზღუდულნი გადაცემის სიმძლავრის თვალსაზრისით რაც საჭიროებს რესურსების განაწილების, კავშირის დამყარების და ენერგო მოთხოვნილებების დეტალურ დაგეგმარებას.

სენსორების შემუშავების განვითარებამ ცხადყო, რომ მოთხოვნები მათი ზომების შემცირებასთან, მუშაობის ხანგრძლივობასთან და ეფექტურობასთან უფრო და უფრო იზრდება. უახლოეს მომავალში ამ სახის ქსელები მნიშვნელოვან როლს შეასრულებენ ჩვენს ცხოვრებაში, იგეიშება მათი რიცხვის რამდენიმე მილიარდამდე გაზრდა. ტექნოლოგია, რომელიც განკუთვნილია „მართვისა და აღქმისათვის“ აქვს დიდი პოტენციალი განვითარებისა და წინსვლისთვის, რადგან მათი გამოყენება შესაძლებელია არა მხოლოდ მეცნიერებასა და ინჟინერიაში არამედ სხვა ყოველ დღიურ საყოფაცხოვრებო საქმიანობაშიც, ასევე გარემოსა და ჯანმრთელობის დაცვაში, კვების ტექნოლოგიებში, ცხოვრების ხარისხის გასაუმჯობესებასა და ა.შ. სენსორების ღირებულების შემცირება და მათი ხარისხის ზრდა გამოიწვევს მრეწველობისა და ბიზნესის განვითარებას რადგან ამ სახის მოწყობილობებს მომხმარებლისთვის უამრავი სარგებლის მოტანა შეუძლია.

მოგეხსენებათ სენსორული ქსელის გადაცემა და კვების მოხმარება ძირითადად დამოკიდებული პროტოკოლებზე რომელსაც ის იყენებს. GSP,

იგივე დიალოგზე ორიენტირებული ძილის პროტოკოლი, ოპტიმალურად ასრულებს ენერჯის დაზოგვის, კავშირის დამყარების და რამოდენიმე MAC ფუნქციას სხვა მსგავს პროტოკოლებთან შედარებით. ნაშრომში GSP ეფექტური მუშაობა დამოწმებულია ექსპერიმენტის გზით. GSP პროტოკოლის ეფექტური მუშაობა დაიტესტა Mica2 ტიპის სენსორული კვანძებით. შედეგად მიღებულ იქნა, ენერჯის რეზერვების ეფექტური განაწილება, ისევე როგორც ინფორმაციის გადაცემა-მიღება, რაზეც საბოლოო ჯამში ნაკლები ენერჯის დანახარჯები იქნა მიღებული. ამასთან ჩვენ ასევე შევხებით განსხვავებულ მეთოდებსა და მიდგომებს, ერთ-ერთს ასევე წარმოადგენს LEACH პროტოკოლი.

უსადენო სენსორული ქსელი (უსქ) შედგება დაბალი ენერჯო მოხმარების მოწყობილობებისაგან, რომლებით ერთმანეთისაგან იზოლირებულ გარემო პირობებშია განლაგებული. რამდენიმე სენსორის გაერთიანებას კლასტერი ეწოდება. თითოეული კლასტერს თავისი მაკონტროლებელი კვანძი აქვს, რომელსაც მმართველი კვანძი ეწოდება. თითოეული კლასტერის მმართველი კვანძის ძირითადი ამოცანაა შეაგროვოს ინფორმაცია რიგითი სენსორული კვანძებიდან და გადასცეს იგი ცენტრალურ სადგურს. რიგითი სენსორული კვანძებს კვება მიეწოდება ინტეგრირებული ელემენტიდან, რომლის ჩანაცვლებაც შეუძლებელია. სწორედ ამიტომ დღეს-დღეობით ენერჯო მომარაგების საკითხი უსქ-ის უმთავრეს პრობლემას წარმოადგენს. ნაშრომში გთავაზობთ სენსორული კვანძების კვებით უზრუნველყოფის გაუმჯობესებულ ვარიანტს, რომელიც საბოლოო ჯამში გაახანგრძლივებს სენსორული ქსელის სამუშაო დროის პერიოდს. ეს მიღწეულ იქნა სენსორულ კლასტერებში ენერჯის მოხმარების ბალანსირების გზით, რომ კავშირის დროს შემცირებულიყო ენერჯის დანაკარგები. გაუმჯობესებული მეთოდი კლასტერის მმართველი კვანძის შერჩევის ახალ მეთოდს გთავაზობს. ასევე, TDMA განრიგების გაუმჯობესებული ვარიანტიც არის შემოთავაზებული. საბოლოო ჯამში ვიღებთ გაუმჯობესებულ მეთოდს, რომელიც უკეთესად ანაწილებს ენერჯის მარაგებს და კავშირის გზებს, ისეთ პროტოკოლებთან შედარებით როგორცაა GSP, LEACH და სხვა მსგავსი პროტოკოლები.

საბოლოოდ შეფასებულია სენსორული კვანძის მდგმარეობა მისი სხვადასხვა სტადიაში ყოფნის და მუშაობის დასრულების დროს. სენსორული კვანძების ძირითად კვების წყაროს წარმოადგენს ელემენტი, რომლის გადამუხტვაც შეუძლებელია, ასევე რთულია მათთვის მუდმივად კვების მიწოდება მათი მუშაობის სპეციფიკიდან გამომდინარე. სენსორული კვანძები ენერჯო რესურსს ძირითადად ხარჯავენ ინფორმაციის შეგროვებაზე და გადაცემაზე. ამ ორი პროცესიდან დადგენილია, რომ ინფორმაციის გადაცემის პროცესი მოიხმარს მეტ ენერჯეტიკულ რესურსს ვიდრე, ინფორმაციის შეგროვების პროცესი, რასაც ნაშრომის ფარგლებში ექსპერიმენტულად დავადასტურებთ. ყოველივე ზემოხსენებულის გათვალისწინებით, დღესდღეობის სენსორული ქსელის უმთავრეს პრობლემას წარმოადგენს ენერჯეტიკული რესურსების სწორი და ოპტიმალური განაწილება.

Abstract

The development and convergence of the Internet, communications and Information Technology, led to the creation of new type of technologies and paved the way to the future technologies which, involves the creation of a new kind of tiny networks called sensor networks. Each sensor network consists tiny devices called sensor nodes. Each sensor node consists of limited processing and computing resources. Sensor nodes with wireless interface can communicate with each other to form a network. Each sensor node uses protocol stack to communicate with each other. Sensor networks protocol stack consists of application layer, transport layer, network layer, data link layer, physical layer and cross-layer protocols. Sensor networks are small sized and low-cost. It is possible to scan differential environmental conditions to organize and collect the data to some location using sensor nodes. It measures of physical conditions like humidity, sound, temperature, pressure, chemical components and vibrations etc., with the growth in technology, sensor network is executed with small, low power, low cost, multi-functional distributed sensors. Sensor nodes can sense, measure and gather information from different environment and they can transmit the sensed data to the central station. The sensor nodes are tightly constrained in terms of transmission power and thus require careful planning of resource, communications and power management.

The development of the sernor networks has made it clear that the requirements with the reduction of their dimensions, work and efficiency duration are more and more growing. In the near future, these kinds of networks will play an important role in our lives, it it already planned to increasing their number to several billions. Technology designed for "sens and monitoring" has great potential for development as they can be used not only in science and engineering but also in other every day householding activities as well as in environment, health care and food technology etc. Reducing the cost of sensor nodes and increasing their quality will lead to industry and business development as these kinds of devices can bring lots of benefits to consumers.

Sensor networks, transmission and power consumption mainly depends on the protocol, that the device is using. GSP is a Gossip-based sleep protocol, which transmit less energy expense information and perform some MAC function compared to others. The effective functioning of GSP has been proven experimentally. GSP is testing the Mica2 platform to extend the network lifecycle. As a result, energy efficiency was obtained, as well as the transfer and reception, for which less energy needs to be spent. Therefore we considere a variety of methods and experimental measurements, one of whitch will be LEACH protocol.

As we have already mentioned wireless sensor networks (WSN) consist of low power devices that are distributed in geographically isolated areas. Sensors are arranged in clusters. Each cluster defines a vital node which is known as a cluster head (CH). Each CH collects the sensed data from its sensor nodes to be transmitted to a central station (CS). Sensors are deployed with batteries that cannot be replaced. The energy consumption is an important concern for WSN. I propose an enhancement approach to reduce the energy consumption and extend the network

lifetime. It has been accomplished by augmenting the energy balancing in clusters among all sensor nodes to minimize the energy dissipation during network communications. The improved method is based on a cluster head selection method. In addition, an enhanced schedule of the TDMA has been implemented. Finally, the development approach indicates the progress in terms of network lifetime, Number of cluster head, energy consumption and number of packets transferred to CS compared to GSP, LEACH and other related protocols.

The condition of the sensor node will be assessed and analyzed when it comes to completion of functionality. In most of the cases the nodes are battery powered and it is not possible to supply them with continuous power supply or change the battery most often. The sensors majorly spend their energy in collecting and transmitting the data. And the data transmission operation consumes more energy than data sensing. The issue of power saving in wireless sensor networks is very paramount in the current scenario of miniaturization.

სარჩევი

გვ.

რეზიუმე	4
Abstract.....	6
ცხრილების წუსხა.....	11
ნახაზების წუსხა.....	13
გამოყენებული აბრევიატურის წუსხა.....	16
შესავალი.....	19
თავი 1. ენერგო მოხმარების ოპტიმიზაციაზე ორიენტირებული კვლევითი სამუშაოების ჩატარება Crossbow_ს სენსორულ კვანძებზე GSP პროტოკოლის გამოყენებით	25
1.1 უსადენო სენსორულ ქსელში GSP პროტოკოლის მუშაობის მიმოხილვა	25
1.2 უსადენო სენსორულ ქსელში წამოჭრილი კვების პრობლემა.....	26
1.3 კვლევის მიმართულების ჩამოყალიბება.....	27
თავი 1_ის შედეგები	28
თავი 2. სენსორული მოწყობილობების რამდენიმე მუშა მოდელის განხილვა	29
2.1 სენსორის განმარტება	29
2.2 ენერგო-მოხმარების დაზოგვის რამდენიმე ექსპერიმენტული მოდელების განხილვა	30
2.2.1 ენერჯის მოხმარების კლასიკური მოდელი	30
2.2.2 μ AMPS სპეციალური მოდელი	31
2.2.3 Mica2, სპეციალური მოდელი	32
2.2.4 Mica2-ის სპეციალური მოდელის გაანალიზება რეალურ მონაცემებზე დაყრდნობით	33
2.3 ექსპერიმენტში გამოყენებული პლატფორმის განხილვა	35
2.3.1 Crossbow-ს სენსორული კვანძები	35
2.3.2 მრავალჯერადი (გადამუხტვადი) ელემენტები	39
2.3.2.1 ძაბვის უკამრისობა	40
2.3.3 TinyOS.....	41
2.4 სენსორულ ქსელში გამოყენებული MAC დონის პროტოკოლი.....	43
2.4.1 CSMA_ზე დაფუძნებული MAC პროტოკოლი.....	44
2.4.2 თვით-ორგანიზებადი MAC პროტოკოლი სენსორული ქსელებისათვის (SMACS)	44
2.4.3 ჰიბრიდული TDMA/FDMA მეთოდი	45
2.5 სენსორულ ქსელებში გამოყენებული გადაცემის პროტოკოლები	46

2.5.1 დაფარვის კონცეფციის მიმოხილვა	46
2.5.2 დიალოგზე ორიენტირებული პროტოკოლის მეთოდი.....	47
2.5.3 GSP: დიალოგის მეთოდზე დაფუძნებული ძილის რეჟიმის პროტოკოლი უსქ- ის ენერგო ეფექტური მუშაობისთვის.....	48
თავი 2_ის შედეგები	49
თავი 3. ექსპერიმენტული სამუშაოს მიმდინარეობა	50
3.1 გამოყენებული მოწყობილობები	50
3.2 სამუშაო არეალი	50
3.3 სენსორულ ქსელებში გამოყენებული ფიზიკური დონის მახასიათებლები	53
3.4 სენსორული ქსელების MAC დონეზე გამოყენებული პროტოკოლი	53
3.5 სენსორულ ქსელებში გამოყენებული ქსელური დონის პროტოკოლი.....	55
3.6 სენსორულ ქსელში გამოყენებული პროგრამული (გამოყენებითი) დონის პროტოკოლი	56
3.7.1 სენსორული ქსელის სასიცოცხლო დროის გაზომვის მიმდინარეობა	56
3.7.2 სენსორული კვანძის ძაბვის საშუალო მნიშვნელობა	57
3.7.3 სენსორული კვანძების ძაბვისა და დენის მომენტალური მნიშვნელობები ...	58
3.7.4 სენსორული კვანძის ანტენის კალიბრაცია.....	59
3.7.5 სენსორული ქსელის გადაცემული და მიღებული სიმძლავრის მნიშვნელობები	59
3.7.6 სენსორულ ქსელში ფრეიმების გადაცემა-მიღების პროცესი.....	60
თავი 3_ის შედეგები	60
თავი 4. ექსპერიმენტულად მიღებული შედეგები და მათი ანალიზი.....	62
4.1 სენსორული ქსელის სასიცოცხლო დროის განსაზღვრის პირველი მეთოდის განხილვა	62
4.2 სენსორული ქსელის მუშაობის დროის განსაზღვრის მეორე მეთოდის განხილვა	65
4.3 ალტერნატიული კვლევები.....	68
4.3.1 მიღებული სიგნალი	68
4.3.2 ხმაურის მნიშვნელობა	71
4.3.3 სენსორული კვანძის სიგნალის სიმძლავრის განსაზღვრა დახურულ გარემოში	72
4.3.4 მოდულირებული სიგნალის ანალიზი	72
4.3.5 ფრეიმის ანალიზი.....	75
4.3.6 სენსორული კვანძისთვის განკუთვნილი ძაბვის მინიმალური საჭირო მნიშვნელობა	76
4.4 ენერგო მოხმარების პროცესი.....	78

4.5 განსხვავებული გადაცემის სიძლავრის დონეები	90
4.5.1 შედეგები 0dBm-ის შემთხვევაში.....	90
4.5.2 შედეგები -20dBm-ის გამოყენების შემთხვევაში.....	92
4.6 სავარაუდო სამუშაო დროის გამოანგარიშება	94
თავი 4_ის შედეგები	98
თავი 5. ენერგო მოხმარების მინიმიზაციის ალერნატიული პროტოკოლი	100
5.1 უსადენო სენსორულ ქსელებში ენერგო მოხმარების მინიმიზაცია თანამედროვე მიდგომის მეთოდებით.....	100
5.2 სენსორული ქსელის მოდელის მიმოხილვა	103
5.3 შერჩეული მიდგომა.....	104
5.4 კლასტერის მმართველი კვანძის შერჩევის მოდიფიცირებული მეთოდი	105
5.5 მოდიფიცირებული TDMA განრიგები	107
თავი 5_ის შედეგები.....	108
თავი 6. ექსპერიმენტული სამუშაო	110
6.1 Arduino Uno-ზე ენერგო მოხმარების შემცირება	110
6.2 ძაბვის რეგულატორი.....	111
6.3 ძაბვის წრფივი რეგულატორის გაუქმება.....	113
6.4 ძაბვის შემცირება.....	113
6.5 USB-სერიული კონვერტორი	114
6.6 LED ინდიკატორების გაუქმება	118
6.6 მიკროპროცესორზე ტაქტური სიჩქარის შემცირება	118
6.7 ენერგიის შენახვის პროცესი პროგრამული ჩარევის გზით.....	119
თავი 6_ის შედეგები	122
დასკვნა	123
გამოყენებული ლიტერატურა	126

ცხრილების ნუსხა

83

ცხრილი 1.	რადიო სიხშირის მახასიათებლები, კლასიკური მოდელი	30
ცხრილი 2.	სენსორის მდგომარეობა μ AMPS მოდელის მიხედვით	31
ცხრილი 3.	დენის მოხმარება Mica2 მოდელის მიხედვით	33
ცხრილი 4.	დენის მოხმარება რეალურ მონაცემებზე დაყრდნობით ...	34
ცხრილი 5.	მანძილები თითოეული კვანძიდან მმართველ კვანძამდე	52
ცხრილი 6.	ლოგირებული ინფორმაციული ფაილის მაგალითი	52
ცხრილი 7.	ქსელის სამუშაო დროში მონაწილე კვანძების გადატვირთვის მაჩვენებლები	64
ცხრილი 8.	სამუსაო დრო გადატვირთვის გარეშე	66
ცხრილი 9.	გაზომილი ხმაურის მნიშვნელობები კვანძთან და ცენტრალურ სადგურთან ახლოს	71
ცხრილი 10.	რეზისტორში არსებული ძაბვის მნიშვნელობა	82
ცხრილი 11.	წრედში არსებული დენის მნიშვნელობა	83
ცხრილი 12.	წრედში არსებული ძაბვის მნიშვნელობა	83
ცხრილი 13.	ენერჯის მოხმარების ჯამური მნიშვნელობები	87
ცხრილი 14.	GSP პროტოკოლის დენის მოხმარების შედარება [26]-თან	89
ცხრილი 15.	ძაბვის მნიშვნელობა რეზისტორში, 0dBm გადაცემის სიმძლავრის შემთხვევაში	91
ცხრილი 16.	დენის მნიშვნელობა წრედში, 0dBm გადაცემის სიმძლავრის შემთხვევაში	91
ცხრილი 17.	კვანძში არსებული ძაბვის მნიშვნელობა, -20dBm	91
ცხრილი 18.	კვანძის მიერ მოხმარებული სიმძლავრის მნიშვნელობა, -20dBm	91
ცხრილი 19.	ძაბვის მნიშვნელობა რეზისტორში, -20dBm_ზე	93
ცხრილი 20.	წრედში გამავალი დენის მნიშვნელობა, -20dBm_ზე	93
ცხრილი 21.	კვანძში არსებული ძაბვის მნიშვნელობა, -20dBm	93
ცხრილი 22.	კვანძის მიერ მოხმარებული სიმძლავრის მნიშვნელობა, -20dBm	93

ცხრილი 23.	კავშირის პროცესი ენერჯის მოხმარების უარეს შემთხვევაში - GSP	96
ცხრილი 24.	Arduino Uno დენის მოხმარება LED ჩართულ/გამორთულ მდგომარეობაში	111
ცხრილი 25.	ATmega16U2 UART კონვერტორზე კვების შეწყვეტის პროცესი	117
ცხრილი 26.	კვების LED ინდიკატორის გათიშვა გვამღევს დენის მოგებას 7mA	118
ცხრილი 27.	Arduino-ს მოხმარებული ენერჯის შემცირებით მიღებული შედეგი	121
ცხრილი 28.	Arduino-ს მოდიფიცირებით მიღებული შედეგები	122

ნახაზების ნუსხა

83.

ნახ 1.	MRP400 (Mica2)	36
ნახ 2.	ATMEL ATMEGA 128L მიკროკონტროლერის სტრუქტურული სქემა	37
ნახ 3.	CC1000-ის სტრუქტურული დიაგრამა	38
ნახ 4.	Energizer NH15-ის განმუხტვის მრუდი	40
ნახ 5.	ძაბვის უკმარისობა Ni-MH ტიპის ელემენტში	41
ნახ 6.	TinyOS-ის აპლიკაციის მუშაობის სტრუქტურული სქემა	43
ნახ 7.	დაფარვის ალგორითმის მუშაობის მაგალითი	47
ნახ 8.	დიალოგის მეთოდის მაგალითი	48
ნახ 9.	GSP ალგორითმის მაგალითი	49
ნახ 10.	კვანძების განლაგება და კავშირის სქემა	51
ნახ 11.	ფრეიმის სტრუქტურა	54
ნახ 12.	დროთი ფრეიმის სტრუქტურა	55
ნახ 13.	მუშა ციკლის სქემა	56
ნახ 14.	კავშირის სქემა ძაბვის გაზომვისთვის	58
ნახ 15.	ანტენის კალიბრაციის აპარატურა	59
ნახ 16.	აპარატურის პარამეტრების განლაგება გადაცემული სიმძლავრის გასაზომად	60
ნახ 17.	ქსელის მუშაობა, განსაზღვრული პირველი კვანძის მიერ	62
ნახ 18.	1_ლი კვანძის ფუნქციონირების შეწყვეტის ადგილმდებარეობა	65
ნახ 19.	სენსორული კვანძების სასიცოცხლო დროის გადატვირთვის პროცესი	65
ნახ 20.	პირველი კვანძის ფუნქციონირების შეწყვეტის ლოკაცია, მეორე მეთოდის მიხედვით	67
ნახ 21.	ქსელის სასიცოცხლო დრო, გადატვირთვის პროცესის განუხორციელებლად	67
ნახ 22.	მიმდებზე მოსული სიგნალის დონე, კვანძი #1	69

ნახ 23.	ცენტრალურ სადგურზე მიღებული სიგნალის მნიშვნელობები 1_ლი კვანძის შემთხვევაში	70
ნახ 24.	ხმაურის მნიშვნელობა გადამცემ კვანძთან ახლოს	71
ნახ 25.	მიღებული სიგნალის სიმძლავრის შედარება მანძილთან	72
ნახ 26.	მიღებული ფრეიმის გრაფი, როდესაც კვანძი ფუნქციონირებს	73
ნახ 27.	1_ლი კვანძიდან მიღებული სიგნალი, როდესაც პაკეტების მიღება ვერ განხორციელდა	74
ნახ 28.	მიღებული სიგნალი, კვანძის გადატვირთვის შემდეგ	74
ნახ 29.	დეკოდირებული ფრეიმის სტრუქტურა	75
ნახ 30.	მოხმარებული ძაბვის მინიმალური მნიშვნელობა, -20dBm	76
ნახ 31.	მოხმარებული ძაბვის მინიმალური მნიშვნელობა, 0dBm	77
ნახ 32.	მოხმარებული ძაბვის მინიმალური მნიშვნელობა, 5dBm	77
ნახ 33.	რეზისტორში არსებული ძაბვის მნიშვნელობა, 903MHz, 5dBm	79
ნახ 34.	რეზისტორზე ძაბვის მიწოდების პროცესის ილუსტრირება რადიო მიმღების დეაქტივირებული მდგომარეობიდან აქტიურში გადასვლის დროს	80
ნახ 35.	რეზისტორზე ძაბვის მნიშვნელობა ფრეიმის გადაცემის პროცესში	80
ნახ 36.	ძაბვის მნიშვნელობა რეზისტორზე, დამახასიათებელი მხოლოდ მიღების პროცესისათვის	81
ნახ 37.	გადაცემული სიგნალი, FFT	82
ნახ 38.	მოხმარების შედარება, გამორთულ რადიო მიმღებზე	83
ნახ 39.	მოხმარების შედარება, ჩართულ რადიო მიმღებზე	84
ნახ 40.	მოხმარების შედარება, გადაცემის პროცესის დროს	84
ნახ 41.	სიმძლავრის მოხმარება ყველა კვანძის შემთხვევაში	85
ნახ 42.	1სთ-ის განმავლობაში მოხმარებული ენერჯის რაოდენობა - GSP	88
ნახ 43.	ძაბვის მნიშვნელობა რეზისტორში, 0dBm	90
ნახ 44.	ძაბვა რეზისტორში, -20dBm	92
ნახ 45.	სიმძლავრის მოხმარების შედარება	94

ნახ 46.	ერთ საათში ენერჯის მოხმარება GSP მოდელის მიხედვით, რადიო-მიმღები აქტივირებული	94
ნახ 47.	TDMA ოპერაცია LEACH არქიტექტურისათვის	100
ნახ 48.	Arduino Uno-ს სამუშაო ძირითადი პლატა	110
ნახ 49.	ქარხნული NCP1117ST50T3G 5ვ@1ა ძაბვის წრფივი რეგულატორი	111
ნახ 50.	პლატაზე არსებულ pin კონტაქტებთან მოსარგებლად DC-DC კონვერტორზე გადაღუნულია ფეხები	112
ნახ 51.	სარჩილავით დამუშავებული პლატაზე არსებული pin კონტაქტები	112
ნახ 52.	Traco TSRN-1 კომუტირებადი რეგულატორის განთავსება პლატაზე	112
ნახ 53.	მაქსიმალური სიხშირე vs. V_{cc}	114
ნახ 54.	Atmega328P V_{CC} vs. მიწოდებული დენი (1მგჰც)	114
ნახ 55.	პლატაზე არსებული 32 პინის გამოანთავისუფლება გარდა C7 კონტაქტისა	116
ნახ 56.	ტრასის გაუქმება, გადაჭრით და ცენტრში არსებული ნივთიერების მოშორება	116
ნახ 57.	4, 31&32 pin კონტაქტებს შორის გახსნილი ტრასა	116
ნახ 58.	pin4 ტრასის გადახსნა ლოკალური კონდენსატორის გათიშვის გარეშე	116
ნახ 59.	13მმ სიგრძის მყარ გამტარიანი სადენი, თავში და ბოლოში 2მმ გაფრცქვნილი და მიერთებული მხოლოდ USB კვებაზე	116
ნახ 60.	RX და TX დიოდებზე ძაბვის გაუქმება	117
ნახ 61.	RX და TX დიოდებზე ძაბვის გაუქმება	118
ნახ 62.	Atmega 328P სიხშირე vs. მიწოდებული დენი (mA)	118

გამოყენებული აბრევიატურის ნუსხა

AC	Alternating current	ცვლადი დენი
ADC	Analog-to-digital converter	ანალოგურ-ციფრული გარდამქმნელი
BS	Base Station	საბაზო სადგური
CPU	Central processing unit	ცენტრალური გამომთვლელი პროცესორი
CSMA	Carrier-sense multiple access	ინფორმაციულ გადამტანზე მრავალ მხრივი მიღწევის მეთოდი
CSMA/CA	Carrier-sense multiple access with collision avoidance	ინფორმაციულ გადამტანზე მრავალ მხრივი მიღწევის მეთოდი, კოლიზიების არიდებით
DA	Destination Address	დანიშნულების მისამართი
DC	Direct current	მუდმივი დენი
EEPROM	electrically erasable programmable read-only memory	ელექტრულად წაშლადი და პროგრამირებადი მუდმივი მეხსიერება
FDMA	Frequency-division multiple access	მრავალ მხრივი მიღწევის მეთოდი სიხშირის დაყოფით
FFT	Fast Fourier transform	ფურიეს სწრაფი გარდასახვა
FSK	Frequency-shift keying	სიხშირული მანიპულაციის მეთოდი
GSP	Gossip-based sleep protocol	დიალოგზე ორიენტირებული ძილის პროტოკოლი
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	ელექტორტექნიკისა და ელექტრონიკის ინჟინერთა ინსტიტუტი
ISCP	In-system programming	სისტემური პროგრამისტი
ISO	International Organization for Standardization	სტანდარტიზაციის საერთაშორისო ორგანიზაცია
ITU	International Telecommunication	კავშირგაბმულობის

	Union	საერთაშორისო კავშირი
JTAG	Joint Test Action Group	ცდებზე ორიენტირებული ჯგუფი
LED	Light-emitting diode	სინაფლი-ამომფრქვევი დიოდი
MAC	Media Access Control	მედიაზე წვდომის კონტროლის პროტოკოლი
MIPS	Microprocessor without Interlocked Pipelined Stages	მიკროკონტროლერი ბლოკირებადი კონვეირული კასკადების გარეშე
MOSFET	metal-oxide-semiconductor field-effect transistor	უნიპოლარული ტრანზისტორი მეტალ-ოქსიდ ნახევარგამტარი
MWSN	Mobile Wireless Sensor Network	მომრავი უსადენო სენსორული ქსელი
NCB	Non-Consistent Behavior	შეუთანხმებელი მოქმედება
NRZ	Non-return-to-zero coding	კოდირება 0_ზე დაბრუნების გარეშე
NT	Non-Transmitting	არ ხორციელდება გადაცემა
OSI	Open Systems Interconnection	ღია სისტემის ურთიერთკავშირის მოდელი
PWM	Pulse-width modulation	იმპულსის თანმდევი მოდულაციით
RISC	Reduced instruction set computer	კომპიუტერი შეზღუდული ბრძანებებით.
RSSI	Received signal strength indication	მიღებული სიგნალის სიმძლავრის ინდიკატორი
RX	Receive	მიღების პროცესი
SMACS	Self-Organizing Medium Access Control	თვით ორგანიზებადი MAC ოპერაცია
SPI	Serial Peripheral Interface	სერიული პერიფერიული ინტერფეისი
SRAM	Static random-access memory	სტატიკური ოპერატიული მეხსიერება

TCP	Transmission Control Protocol	გადაცემის კონტროლის პროტოკოლი
TDMA	Time-division multiple access	მრავალჯერადი მიღწევის ეთოდი დროითი დაყოფით
TX	Transmit	გადაცემის პროცესი
UART	universal asynchronous receiver-transmitter	უნივერსალური ასინქრონული მიმღებ-გადამცემი
UDP	User Datagram Protocol	მომხმარებლის დატაგრამის პროტოკოლი
USB	Universal Serial Bus	უნივერსალური სერიული ინტერფეისი
VCO	voltage-controlled oscillator	ოსცილატორი ძაბვის კონტროლით
WSN	wireless sensor network	უსადენო სენსორული ქსელი
უსქ	—	უსადენო სენსორული ქსელი

შესავალი

პრობლემის აქტუალურობა. უსადენო სენსორული ქსელი - უსქ (WSN- Wireless Sensor Network) წარმოადგენს ტელეკომუნიკაციის თანამედროვე ტექნოლოგიების განვითარების ერთ-ერთ ყველაზე პერსპექტიულ მიმართულებას. მისი გამოყენების პერსპექტივა გამოიწვია ინტერნეტის, კავშირგაბმულობისა და ინფორმაციული ტექნოლოგიების განვითარებამ და მათმა დაახლოებამ. გზა გაუხსნა მომავლის ისეთი ტექნოლოგიებს განვითარებას რომელებიც თავისთავში გულისხმობს ახალი სახის სენსორული ქსელის შექმნასა და მათ განვითარებას. სენსორულმა მოწყობილობებმა უნდა შეეძლონ დიდი მოცულობის ინფორმაციის გადაცემა და მიღება, მაღალი ხარისხით და სიზუსტით. ტექნოლოგიური პროგრესის ბოლო მიღწევებმა შესაძლებელი გახადა შექმნილიყო იაფი მინიატურული გამომთვლელები მცირე ენერგო-მოთხოვნილებით, აღჭურვილები რადიო მიმღებ- გადამცემებით, რომელთაც შეუძლიათ როგორც ლოკალური კავშირი ერთმანეთთან, ასევე გლობალური კავშირი, გარე მოწყობილობებთან უსადენო კავშირით.

სერნორების მუშაობის განვითარებამ ცხადყო, რომ მოთხოვნები იზრდება როგორც მათი ზომები შემცირებისაკენ, ასევე მათი მუშაობისა და ეფექტურობის გახანგრძლივებისაკენ.

უახლოეს მომავალში ამ სახის ქსელები მნიშვნელოვან როლს შეასრულებენ ჩვენს ცხოვრებაში, იგეიმება მათი რიცხვის რამდენიმე მილიარდამდე გაზრდა. ტექნოლოგია, რომელიც განკუთვნილია „მართვისა და აღქმისათვის“ აქვს დიდი პოტენციალი განვითარებისა და წინსვლისთვის, რადგან მათი გამოყენება შესაძლებელია არა მხოლოდ მეცნიერებასა და ინჟინერიაში არამედ სხვა ყოველდღიურ საყოფაცხოვრებო საქმიანობაშიც, როგორც მაგალითად: გარემოსა და ჯანმრთელობის დაცვაში, კვების ტექნოლოგიეში, ცხოვრების ხარისხის გასაუმჯობესებასა სფეროში და ა.შ.

სენსორების ღირებულების შემცირება და მათი ხარისხის ზრდა გამოიწვევს მრეწველობისა და ბიზნესის განვითარებას რადგან ამ სახის მოწყობილობებს მომხმარებლისთვის უამრავი სარგებლის მოტანა შეუძლია.

სენსორული ქსელების ელემენტები ამჟამად წარმოდგენილია მრავალი მწარმოებლების მიერ, რასაც მოჰყვა სხვადასხვაგვარი ინდუსტრიული სტანდარტების გამოჩენა, რომლებიც ვერ უზრუნველყოფენ ურთიერთქმედებას სხვადასხვა მწარმოებლების მოწყობილობებს შორის. სენსორულ ქსელებში ენერჯის მიმოცვლა და მოხმარება ძირითადად დამოკიდებულია პროტოკოლების მუშაობაზე რომლებსაც უშუალოდ ეს მოწყობილობები იყენებენ. ძირითადი სამუშაოები სენსორულ ქსელებში გამოყენებული პროტოკოლების სტანდარტიზაციის სფეროში ტარდება ელექტროტექნიკისა და ელექტრონიკის ინჟინრების ინსტიტუტის (IEEE), ტელეკომუნიკაციის საერთაშორისო კავშირის (ITU), სტანდარტიზაციის საერთაშორისო ორგანიზაციის - ISO მიერ.

შედგება ასობით ათასი მინიატურული მოწყობილობისაგან, რომლებიც ერთმანეთს უკავშირდებიან შეზღუდული ინტეგრირებული კვების წყაროს საშუალებით. ეს მოწყობილობები განაწილებულია რელურ გარემოში, გარემოდან შეგროვებული მონაცემებს პირდაპირ ცენტრალუს სადგურზე (BS) აგზავნიან. ცენტრალური კვანძი (BS) წარმოადგენს მოწყობილობას რომელიც მართავს, მონიტორინგს უწევს და უზრუნველყოფს ინფორმაციის შეგროვებას სენსორული კვანძებიდან. ეს მოწყობილობა აანალიზებს მიღებულ მონაცემთა შორის მსგავსებას, რომელსაც იყენებს დაქვემდებარებული კვანძების მუშაობის სამართავად.

ენერგო-ეფექტური მუშაობა უსქ-ის უმთავრესი პრობლემაა, რადგან ეს მოწყობილობები შემუშავებულია მრავალწლიანი არამომსახურებადი თვითორგანიზებადი მუშაობისთვის. ენერგო მომსახურების სირთულეს ასევე განაპირობებს სენსორული კვანძების განლაგების არეალი, რომელიც ზოგადად შეიძლება მიუვალი და მიუდგომელი გარემო პირობები იყოს,

სადაც სენსორული კვანძებისთვის ელემენტის გამოცვლა შეუძლებელი იქნება. სწორედ ამიტომ ენერგო მომარაგება, კერძოდ მკვებავი ელემენტი უსადენო სენსორული ქსელების უმნიშვნელოვანესი შედაგენელი კომპონენტია.

უსადენო ქსელებში, ენერგიის ძირითადი დანახარჯი ინფორმაციის მიმოცვლაზე მოდის, ამის შესამცირებლად საჭიროა ენერგიის ოპტიმიზირების პროტოკოლების გამოყენება.

OSI ზოგადი კავშირის მოდელი სრულად ვერ ერგება ამ ტიპის ქსელის ორგანიზებას. სხვა ტიპის მოდელებიც ასევე არასრულ გამოყენებას პოულობენ ამ სფეროში, რომლებიც სენსორულ ქსელში მოიცავენ პროტოკოლების შემდეგ სტეკებს: ფიზიკურ დონეს, MAC დონეს, ქსელის დონეს, სატრანსპორტო დონეს და სააპლიკაციო (პროგრამულ) დონეს, ამასთან ასევე მოიცავენ ენერგეტიკული რესურსების მართვის დონეს, მობილურობის მართვის დონეს (უსადენო მობილური სენსორული კვანძების შემთხვევაში) და ამოცანების შესრულებისა და დაგეგმარები ფუნქციებს. სწორედ ამიტომ უნივერსალურად არც ერთი მოდელი არ ერგება.

მიუხედავად იმისა, რომ სენსორული კვანძის დახასიათება როდესაც იგი მუშა ან უფუნქციო მდგომარეობაშია თეორიულად მარტივად და ნათლად განიმარტება, ცდების შედეგებიდან დასტურდება, რომ ამის გაკეთება პრაქტიკაში მარტივი აღარ არის. სხვადასხვა გამოთვლითი ხელსაწყოების დახმარებით გაანალიზდა, რომ გარკვეული სიმძლეები არსებობს სენსორული კვანძის განმარტებასთან რომელიც ასახავს ფუნქციონირების შეწყვეტას. აქ იგულისხმება გარემოება როდესაც ყველა ტექნიკური პარამეტრის მიხედვით სენსორული კვანძი არ უნდა მუშაობდეს და უნდა იყოს ე.წ. „სიკვდილის სტადიაში“, მაგრამ ექსპერიმენტული სამუშაოების შედეგად დგინდება, რომ სენსორული კვანძების უმეტესობა მაინც განაგრძობენ ფუნქციონირებას თუმცა არა ნორმალური, გამართული რეჟიმის ფარგლებში.

ნაშრომის ფაზგლებში შევებებით სენსორული მოწყობილობების პროგრამულ და აპარატურულ მხარეს, ექსპერიმენტული სამოშაოებისათვის გამოვიყენებთ სხვადასხვა ხელსაწყოებს (მრავალ-მზომი, ოსცილოგრაფი და ა.შ.). გაზომილი შედეგებს გამოვიყენებთ ენერგო-ეფექტური პროტოკოლის ენერგის ზოგადი სურათის შესაქმნელად.

სამუშაოს მიზანი და კვლევის ამოცანები. დისერტაციის მიზანს წარმოადგენს უსქ-ს მახასიათებლების შესწავლა და განვრცობა თეორიული და ექსპერიმენტული სამუშაოების საფუძველზე, პარამეტრების განსაზღვრა, ქსელის კვანძების ენერგომოხმარების მინიმიზაცია და საბოლოოდ სიცოცხლის დროის გაზრდა, ენერგო ეფექტური პროტოკოლის მოდელის შემუშავება ენერგო რესურსების მაქსიმალური ოპტიმიზირებისათვის.

დასახული მიზნის მიღწევისათვის გადაწყვეტილი იქნა შემდეგი ამოცანები:

1. უსადენო სენსორული ქსელის არქიტექტურის, პროტოკოლების და დანართების ანალიზი;
2. შესწავლისია და შემუშავებულია სენსორული ქსელის სიცოცხლის დროის განსაზღვრის ალგორითმები;
3. ქსელის ფუნქციონირების პარამეტრებზე დამოკიდებულებით განსაზღვრულია ქსელის სიცოცხლის დრო.
4. ექსპერიმენტულად გაანალიზებულია სენსორული კვანძების მუშაობის ეფექტურობა მათი სხვადასხვა გარემოში ყოფნის დროს;
5. შემოთავაზებულია გადაწყვეტა რომლის მიხედვითაც შესაძლებელია განისაზღვროს ენერგო-ეფექტური პროტოკოლის შემუშავება;
6. შემუშავებულია ენერგო ეფექტური პროტოკოლების პრაქტიკში გამოყენების მაგალითები;

7. ჩატაერებულია პრაქტიკული ექსპერიმენტული სამუშაო Arduino UNO-ს პლატფორმაზე.

კვლევის მეთოდოლოგია. დისერტაციაში განხილულია სენსორული კვანძები მუშაობის უახლესი ალგორითმები, განხილულია მათი გამოყენების ეფექტურობის დადებითი და უარყოფითი მხარეები. შევსებით მის პროგრამულ მხარეს და მასთან მუშაობის კოდს და მის გამოყენებას დღევანდელ პრაქტიკაში.

მეცნიერული სიახლე. მიდგომა დაფუძნებულია Crossbow Mica2 და Arduino UNO-ს პროტოკოლის სტეკის მოდიფიკაციაზე. განხილული და გაზომილი იქნება თითოეული პლატფორმის მახასიათებლები და ენერგო დანახარჯები ამათუიმ ამოცანაზე. საბოლოოდ დასკვნს სახით განიხილება ენერგო-ეფექტური პროტოკოლის შემოთავაზება თითოეული პლატფორმისთვის. დისერტაციის ძირითადი შედეგები, რომლებიც წარმოადგენენ მეცნიერულ სიახლეს შემდეგია:

1. დამუშავებულია სენსორული ქსელის სიცოცხლის დროის განსაზღვრის ალგორითმები, რომლებიც საშუალებას იძლევა დაფიქსირდეს ქსელის მწყობრიდან გამოსვლის მომენტი თვითაღდგენის შესაძლებლობის გათვალისწინებით;
2. გასაზღვრულია სენსორული ქსელის სიცოცხლის დროის შეფასების მეთოდიკა;
3. შემუშავებულია სენსორული ქსელის სიცოცხლის დროის მაქსიმიზაციის მეთოდი;
4. შექმნილია სენსორული ქსელის ენერგო-ეფექტურობის მოდელი ელექტროენერგიის განაწილების სისტემების მონიტორინგისათვის უსქ-ის გამოყენებით.

პრაქტიკული ღირებულება და სამუშაოს შედეგების რეალიზაცია. სამუშაოს პრაქტიკულ ღირებულებას წარმოადგენს მიღებული შედეგების გამოყენების შესაძლებლობა უსქ-ს პროექტირებისათვის, დაგეგმისათვის და ზღვრული მახასიათებლების გათვალისათვის. უსადენო სენსორული

ქსელების კვლევის შედეგები ასევე გამოყენებული იქნება სასწავლო პროცესში.

სამუშაოს აპრობაცია. სადისერტაციო ნაშრომის ძირითადი შედეგები მოხსენებული იყო სტუ-ის ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის ტელეკომუნიკაციის დეპარტამენტში გამართულ, სადოქტორო პროგრამით გათვალისწინებულ, I, II და III კოლოქვიუმებზე და წინასწარ დაცვაზე, ასევე, მოხსენებულ იქნა მე-2 საერთაშორისო სამეცნიერო-ტექნიკურ კონფერენციაზე - „ენერგეტიკის თანამედროვე პრობლემები და მათი გადაწყვეტის გზები“. თბილისი, სტუ, 2020 წლის 7 – 10 დეკემბერი.

გარდა ამისა სადისერტაციო თემის ძირითადი შისი ასახულია 4 პუბლიკაციაში.

თავი 1. ენერგო მოხმარების ოპტიმიზაციაზე ორიენტირებული კვლევითი სამუშაოების ჩატარება Crossbow_ს სენსორულ კვანძებზე GSP პროტოკოლის გამოყენებით

1.1 უსადენო სენსორულ ქსელში GSP პროტოკოლის მუშაობის მიმოხილვა

უსადენო სენსორული ქსელი (WSN - უსქ) შედგება ასობით ათასი მინიატურული მოწყობილობისაგან, რომლებიც ერთმანეთთან დასაკავშირებლად იყენებენ შეზღუდულ ინტეგრირებულ კვების წყაროს. ეს მოწყობილობები განაწილებულია რელურ გარემოში, ხოლო გარემოდან შეგროვებულ მონაცემებს აგზავნიან ცენტრალუს სადგურზე (BS). ცენტრალური კვანძი (BS) წარმოადგენს მოწყობილობას რომელიც მართავს, მონიტორინგს უწევს და უზრუნველყოფს ინფორმაციის შეგროვებას სენსორული კვანძებიდან. ეს მოწყობილობა აანალიზებს მიღებულ მონაცემთა შორის მსგავსებას, რომელსაც იყენებს დაქვემდებარებული კვანძების მუშაობის სამართავად.

ენერგო-ეფექტური მუშაობა უსქ-ის უმთავრესი პრობლემაა, რადგან ეს მოწყობილობები შემუშავებულია მრავალწლიანი არამომსახურებადი თვითორგანიზებადი მუშაობისთვის. ენერგო მომსახურების სირთულეს ასევე განაპირობებს სენსორული კვანძების განლაგების არეალი, რომელიც ზოგადად შეიძლება მიუვალი და მიუდგომელი გარემო პირობები იყოს, სადაც სენსორული კვანძებისთვის მკვებავი ელემენტის გამოცვლა შეუძლებელი იქნება. სწორედ ამიტომ ენერგო მომარაგება, კერძოდ მკვებავი ელემენტი უსადენო სენსორული ქსელების უმნიშვნელოვანესი შედაგენელი კომპონენტია.

უსადენო სენსორულ ქსელებში ენერჯის მიმოცვლა და მოხმარება ძირითადად დამოკიდებულია პროტოკოლების მუშაობაზე, რომლებსაც უშუალოდ ეს მოწყობილობები იყენებენ. **GSP-დიალოგზე ორიენტირებული ძილის პროტოკოლი**, ახორციელებს ინფორმაციის გადაცემას და ზოგიერთ MAC ფუნქციონალს სხვებთან შედარებით ნაკლები ენერგეტიკული რესურსის გამოყენების ხარჯზე. GSP-ს ეფექტური მუშაობა

ექსპერიმენტულად უკვე დადასტურდა. GSP პროტოკოლის ტესტირება განვახორციელეთ Mica2 სენსორული კვანძების პლატფორმაზე, ქსელის მუშაობის დროის გასახანგრძლივებლად. შედეგად ენერგო რესურსების გამოყენების ეფექტურობა და გადაცემა-მიღებაზე რაც შეიძლება ნაკლები ენერჯის დანახარჯი მივიღეთ, ასევე ჯამურად ქსელის მუშაობაზე ნაკლები ენერჯია დაიხარჯა, სწორედ ამიტომ სხვადასხვა მეთოდებს და ექსპერიმენტულ გაზომვებს განვიხილავთ. გაზომილი და გაანალიზებულ იქნება სენსორული კვანძის მდგომარეობა მაშინ როდესაც იგი ფუნქციონირების დასასრულს უახლოვდება. განხორციელდება ასევე ენერგოოპტიმიზაციის რამდენიმე პლატფორმის შედარება.

1.2 უსადენო სენსორულ ქსელში წამოჭრილი კვების პრობლემა

უსადენო კომუნიკაციის განვითარება საშუალებას იძლევა შეიქმნას ქსელი პატარა სენსორული მოწყობილობებისგან. ასეთმა სენსორულმა ქსელებმა გამოყენება მრავალ სფეროში ჰპოვეს როგორცაა, სამხედრო ინდუსტრია, ჯანდაცვა, ქალაქის სატრანსპორტო მონიტორინგი, ამინდის მონიტორინგი, ფართო მოხმარების საქონლის მონიტორინგი, სახლისა და შენობა ნაგებობების მონიტორინგი, და ა.შ. [3] [32]. თუმცა მანამ სანამ სენსორული ქსელი სრულად ფუნქციონალური გახდება, მისი ოპერირებისთვის წარმოქმნილი მრავალი დაბრკოლება უნდა გადაიჭრას[3].

სენსორული ქსელისთვის კრიტიკულად ყველაზე სუსტი წერტილია ის, რომ მისი ოპერირება სრულად დამოკიდებულია მასში ინტეგრირებულ მკვებავ ელემენტზე.

შემდეგ კრიტიკულ წერტილს წარმოადგენს სენსორული კვანძების არათანაბარი განთავსება დიდ ფართობზე და ეს ართულებს სენსორულ კვანძში ელემენტის გამოცვლას ან არსებულის გადამუხტვას. სწორედ ამიტომ სენსორულ კვანძებსა და ზოგადად ქსელში ყველა სისტემური პროცესი და კავშირის პროტოკოლები უნდა იყოს მორგებული ენერგო მოხმარების მინიმიზაციაზე. დღესდღეობით ენერგო მოხმარებაზე ჩატარებული კვლევები ძირითადად დაფუძნებულია თეორიულ

მოდელზე ან კომპიუტერულ სიმულაციებზე. ჰეიზმანის მიერ ჩატარებული კვლევა ენერგეტიკული რესურსის მინიმიაზაციისათვის ხშირად გამოიყენება ამ ტიპის მოწყობილობების განხილვის დროს [24]. ასეთი ტიპის მოდელებს ვრცლად 2.2 პარაგრაფში შევხებით, თუმცა ამას გარდა სხვა კვლევებსაც შევხებით, რომლებიც ამ სფეროს მოიცავენ. განვიხილავთ ანასტასის კვლევას, რომელმაც გაანალიზა სენსორული კვანძის ენერგო მოხმარების პროცესი, ვოლტმეტრით საშუალო ძაბვის გაზომვით [17]. სხვა კვლევა გვთავაზობს სენსორებზე ენერჯის გაზომვას ოსცილოგრაფის საშუალებით, სენსორული კვანძის სხვადასხვა მდგომარეობაში ყოფნის დროს.

1.3 კვლევის მიმართულების ჩამოყალიბება

ეს მიმართულება წარმოადგენს სენსორული ქსელის მუშაობის ანალიზს დამყარებულს Crossbow Mica2 კვანძებზე, რომელშიც გამოყენებული იქნა GSP პროტოკოლი [1]. სენსორული ქსელი რომელსაც განვიხილავთ შედგება ექვსი დაქვემდებარებული და ერთი მმართველი კვანძისაგან. ტესტის მიმდინარეობა შეადგენს ოთხ თვეს, ეს იმიტომ, რომ სენსორულ ქსელში არსებული ყველა მოვლენა, რომ მაქსიმალური სიზუსტით იქნას შესწავლილი. ამ ექსპერიმენტის მთავარი შედეგი არის სენსორული კვანძებში სიმძლავრისა და ენერგო მოხმარების დეტალური შესწავლა მათი მუშაობის პროცესში და მაშინ როდესაც ისინი ფუნქციონირების დასასრულს უახლოვდებოდნენ. მიუხედავად იმისა, რომ სენსორული კვანძის დახასიათება, როდესაც იგი მუშა ან უფუნქციო მდგომარეობაშია, თეორიულად მარტივად და ნათლად განიმარტება. თუმცა მრავალი ცდის შედეგებიდან დასტურდება, რომ ამის გაკეთება პრაქტიკაში მარტივი არ არის.

სენსორის ფუნქციონირების შეწყვეტის ორი ძირითადი საფუძველი არსებობს. პირველი როდესაც ყველა კვანძი წყვეტს ფუნქციონირებას [1], [24, 28] და მეორე როდესაც მმართველის შემდეგი პირველი კვანძი წყვეტს ფუნქციონირებას [28, 29]. ორივე განმარტება ინდივიდუალურად

მიესადაგება სენსორული კვანძის ფუნქციონირების შეწყვეტის განმარტებას. აქ კვანძის ფუნქციონირების შეწყვეტაში იგულისხმება მდგომარეობა, როდესაც ის თავის ენერგეტიკულ რესურსს სრულად ამოწურავს.

მიუხედავად ამისა, ეს ექსპერიმენტი სრულად მაინც ვერ ასახავს სენსორული კვანძის ფუნქციონირებაზე ზემოქმედი პროცესების გავლენას, რაც რეალურ გარემო პირობებში სავსებით ნორმალური მოვლენაა. სხვადასხვა მზომი ხელსაწყოების დახმარებით გაანალიზდა, რომ გარკვეული შეუსაბამობები არსებობს სენსორული კვანძის განმარტებასთან რომელიც ასახავს ფუნქციონირების შეწყვეტას. აქ იგულისხმება გარემოება როდესაც ყველა ტექნიკური პირობების მიხედვით სენსორული კვანძი არ უნდა მუშაობდეს და უნდა იყოს ე.წ. „სიკვდილის სტადიაში“, მაგრამ სენსორული კვანძების უმეტესობა მაინც განაგრძობენ ფუნქციონირებას, თუმცა არა ნორმალური, გამართული რეჟიმის ფარგლებში.

თავი 1_ის შედეგები

განხილული და კლასიფიცირებულია უსადენო კავშირის ქსელების განვითარების თანამედროვე კონცეფციები. თავის დასაწყისში ზოგადად აღწერილია GSP პროტოკოლის ზოგადი განხილვა, რომელიც ახორციელებს ინფორმაციის გადაცემას და ზოგიერთ MAC ფუნქციონალს სხვებთან შედარებით ნაკლები ენერგეტიკული რესურსის გამოყენების ხარჯზე.

ზოგადი მიმოხილვა არის გაკეთებული უსადენო სენსორულ ქსელებში მოხმარებულ ენერგიაზე.

ჩამოყალიბებულია კვლევის მიმართულება. დადგენილია ექსპერიმენტის მსვლელობის პროცესი.

თავი 2. სენსორული მოწყობილობების რამდენიმე მუშა მოდელის განხილვა

2.1 სენსორის განმარტება

სენსორის ზოგადი განმარტება შეიძლება შემდეგნაირად ფორმულირდეს „სენსორი წარმოადგენს გამომთვლელ მოწყობილობას, რომელიც აწარმოებს დაკვირვებას გარემოში ფიზიკური თუ ქიმიური პროცესების მსვლელობაზე“ [30]. უფრო კონკრეტულად სენსორი წარმოადგენს მოწყობილობას რომელიც აგროვებს ინფორმაციას გარემოს შემდეგ მახასიათებლებზე: სითბო, სინათლე, წნევა და ა.შ. ამის შემდეგ აგენერირებს გადასაცემ სიგნალს რომლის გაზომვა ან ინტერპრეტირება იქნება შესაძლებელი ადამიანისათვის [31]. სენსორული ქსელის შემსწავლელი ჯგუფები ხშირად (თუმცა არა ყოველთვის) ახასიათებენ სენსორს, როგორც პატარა უსადენო მოწყობილობას, რომელსაც შეუძლია მონაცემების შეკრება ერთი ან რამდენიმე გადამწოდვიდან, დაამუშაოს ეს ინფორმაცია და გადასცეს პატარა მანძილზე რადიო სიგნალების საშუალებით. სენსორული კვანძები სამუშაოდ იყენებენ ელექტრონულ წრედებს, რაც ენერგო რესურსის გამოყენებას ბევრად ზოგავს [3]. სენსორებში იგულისხმება სინათლის, ხმის ან ტემპერატურის გამზომი მოწყობილობა. თუმცა სენსორებს ასევე შეუძლიათ სხვადასხვა ცვლადების გაზომვაც, მაგალითად როგორცაა ელექტრომაგნიტური ველი ან ვიბრაცია, ნივთიერების ქიმიური შემადგენლობა და ა.შ. [2]. სენსორები გადასცემენ ინფორმაციას უსადენოდ, ერთ ან რამდენიმე ცენტრალურ კვანძს (სადგურს) [3].

სენსორული ქსელი, წარმოადგენს უსადენო ველს რომელშიც გაერთიანებულია კვანძების დიდი რაოდენობა (ასობით და ათასობით), რომლებიც ზოგად შემთხვევაში ქაოტურად განლაგდებიან. ღია სისტემების ურთიერთქმედების მოდელი (OSI) სრულად ვერ ერგება ამ ტიპის ქსელის ორგანიზებას. სხვა ტიპის მოდელებიც ასევე არასრულ გამოყენებას პოულობენ ამ სფეროში, რომლებიც სენსორულ ქსელში მოიცავენ პროტოკოლების შემდეგ სტეკს, ფიზიკურ დონეს, MAC დონეს,

ქსელის დონეს, სატრანსპორტო დონეს და პროგრამული დონეს, ამასთან ასევე მოიცავენ ენერგეტიკული რესურსების მართვის დონეს, მობილურობის მართვის დონეს (უსადენო მობილური სენსორული კვანძების შემთხვევაში) და ამოცანების შესრულებისა და დაგეგმარების ფუნქციებს [3]. სწორედ ამიტომ სენსორულ ქსელებს უნივერსალურად არც ერთი მოდელი არ ერგება.

2.2 ენერგო-მოხმარების დაზოგვის რამდენიმე ექსპერიმენტული მოდელების განხილვა

2.2.1 ენერჯის მოხმარების კლასიკური მოდელი

ჰეინზელმანის (Heinzelman) მიერ შემოთავაზებული არის სენსორების მიერ ენერგეტიკული რესურსების მოხმარების გამოთვლაზე დაკვირვება, რომლის მიხედვითაც ენერგეტიკული რესურსის ყველაზე დიდი წილი კავშირის განხორციელებაზე და მის მუშაობაზე პასუხისმგებელ სისტემებზე მოდის [24]. ცხრილი 1 ასხავს ამ მოდელის დეტალებს.

ცხრილი 1. რადიო სიხშირის მახასიათებლები, კლასიკური მოდელი

რადიო სიხშირე	ენერგო მოხმარება
გადამცემის ელ. მოხმარება ($E_{Tx-elec}$) მიმღების ელ. მოხმარება ($E_{Rx-elec}$) ($E_{Tx-elec} = E_{Rx-elec} = E_{elec}$)	50nJ/bit
გადამცემის გამაძლიერებელი (ϵ_{amp})	100 pJ/bit/m ²
ლოდინის რეჟიმში (E_{idle})	40nJ/bit
ძილის რეჟიმში	0

ეს მოდელი გვთავაზობს გადაცემის რეჟიმში ენერგეტიკული რესურსის შემცირებას სხვა სტანდარტულ მოდელებთან შედარებით, მაგალითად Bluetooth [24]. ამ მოდელის მიხედვით დამუშავებისთვის ხდება ერთი და იგივე ათვლის წერტილის გამოყენება, თუმცა უსადენო სენსორულ ქსელებში ამ მოდელმა სრული გამოყენება ვერ ჰპოვა. რადგან როდესაც სენსორული კვანძი იწყებს ენერჯის გამოყენებას, გამოთვლითი პროცესორი ან უშუალოდ სენსორი შესაძლოა არ იყვნენ ენერჯის გამომყენებლები, რადგან ეს დამოკიდებულია ამოცანაზე და გარემო

პირობებზე. სწორედ ამიტომ მნიშვნელოვანია ენერგო მოხმარება რადიო მოდულთან ერთად სინქრონულად განხორციელდეს და არ იყოს მხოლოდ მორგებული რადიო მოდულზე, რომელიც ენერგიის ყველაზე დიდი მომხმარებელია.

2.2.2 μ AMPS სპეციალური მოდელი

შიჰმა (Shih) [33] წარმოადგინა შემდეგი მოდელი, რომლის განვითარებაც განხორციელდა სპეციფიური პლატფორმისთვის - μ AMPS უსადენო სენსორული კვანძისთვის. პლატფორმა აღჭურვილი იყო ძლიერი ARM SA-1110 მიკროპროცესორით, ტაქტური სიხშირით 59მგჰც-დან 206მგჰც-მდე. მოდელი ასევე ითვალისწინებს მიკროპროცესორის მიერ ენერგო მოხმარებას, დანაკარგებს და განზოგადებულ მოხმარებას რადიო სიხშირის მიმღებ-გადამცემის მიერ [33]. ცხრილ 2-ში შეჯამებულია ეს მახასიათებლები.

ცხრილი 2. სენსორის მდგომარეობა μ AMPS მოდელის მიხედვით

მდგომარეობა	SA-1110	Sensor,A/D	რადიო სიხშირე	P_k (mW)
აქტიური	აქტიური	აღქმის რეჟიმი აქტიურია	გადაცემა/მიღება	1040
მზადყოფნის რეჟიმი	მზადყოფნის რეჟიმი	აღქმის რეჟიმი აქტიურია	მიღება	400
მონიტორინგის რეჟიმი	ძილის რეჟიმი	აღქმის რეჟიმი აქტიურია	მიღება	270
დაკვირვების რეჟიმი	ძილის რეჟიმი	აღქმის რეჟიმი აქტიურია	გამორთულია	200
ძილის რეჟიმი	ძილის რეჟიმი	აღქმის რეჟიმი დეაქტიუვირებულია	გამორთულია	10

თუმცა, μ AMPS მოდელი არ ითვალისწინებს 1 ბიტ ინფორმაციაზე მიმღებ-გადამცემის ენერგო მოხმარებას. მიუხედავად ამისა პლატფორმა იყენებს 1Mbps, ინფორმაციის გადაცემისათვის, ასე რომ საჭიროების შემთხვევაში შესაძლებელია გამოითვალოს ენერგიის დანახარჯი 1 ბიტი ინფორმაციის გადაცემის დროს, რომელიც ჰილის (Hill) მეთოდით არის

ცნობილი [23]. გადაცემა-მიღების დროს ერთ ბიტზე მოსული ენერგეტიკული რესურსი გამოითვლება შემდეგი გამოსახულებით:

$$\text{დრო, რაც ესაჭიროება ერთი ბიტის გადაცემა-მიღებას} = 1/1\text{Mbps} = 1\mu\text{წმ}$$

$$\text{ენერგია} = \text{სიმძლავრე} \times \text{დროზე} \quad (2.1)$$

სადაც სიმძლავრე მოცემულია ვატებში, ხოლო დრო წამებში

$$\text{ენერგია}_{T \times 1\text{ბიტი}} = 1040 \times 1 \times 10^{-3}\text{ვტ} \times 1 \times 10^{-6}\text{წმ} \quad (2.2)$$

$$\text{ენერგია}_{T \times 1\text{ბიტი}} = 1.04\mu\text{J/ბიტი}$$

$$\text{ენერგია}_{R \times 1\text{ბიტი (მზადყოფნის რეჟიმი)}} = 0.4\mu\text{J/ბიტი} \quad (2.3)$$

$$\text{ენერგია}_{R \times 1\text{ბიტი (მონიტორინგის რეჟიმი)}} = 0.27\mu\text{J/ბიტი} \quad (2.4)$$

განსხვავება μAMPS მოდელსა და კლასიკურ მოდელს შორის მდგომარეობს, გადაცემის სიმძლავრის ორჯერ გაზრდასა და მიმღების სიმძლავრის ერთხელ გაზრდაში[24].

2.2.3 Mica2, სპეციალური მოდელი

პოლასტრე (Polastre) [27] გვთავაზობს Mica2-ისთვის დამახასიათებელ სპეციალურ მოდელს Mica2 ტიპის სენსორული კვანძებისათვის, რომელიც ჯამური ენერგიის მოხმარების პროცესს გვიჩვენებს: გადაცემა-მიღებისთვის, მომლოდინე, მონცაემთა მიმოცვლისა და ძილის რეჟიმისათვის [27]. რიცხვითი მნიშვნელობები მიღებულია პროცესორისა და რადიო მიმღების მოსალოდნელი მნიშვნელობებიდან, რომლებით ინფორმაციულ ბუკლეტშია მოცემული [27]. ცხრილი 3 გვიჩვენებს ამ მონაცემების ილუსტრაციას.

მოდელის მიხედვით, დენის მოხმარებასა და დროის პერიოდთან არის შემდეგი კავშირი: თუ განვიხილავთ, რომ Mica2 ესაჭიროება 3ვ ძაბვა [21], შესაძლებელია ენერგიის გამოთვლა 1 ბიტის გადაცემა-მიღების დროს:

$$\text{ენერგია} = \text{დენი} \times \text{ძაბვა} \times \text{დრო} \quad (2.5)$$

ცხრილი 3. დენის მოხმარება Mica2 მოდელის მიხედვით

მოქმედება	დრო (წმ)		I(mA)	
	რადიომიმღების ინიციალიზაცია (b)	350E-6	t _{rinit}	6
რადიომიმღების აქტივაცია (c)	1.5E-3	t _{ron}	1	C _{ron}
RX/TX კომუტაცია (d)	250E-6	t _{rx/tx}	15	C _{rx/tx}
რადიომიმღების კვანტირების პერიოდი (e)	350E-6	t _{sr}	15	C _{sr}
რადიომიმღებზე კომუტაციის შეფასება (f)	100E-6	t _{ev}	6	C _{ev}
1 ბიტის მიღება	416E-6	t _{rxb}	15	C _{rxb}
1 ბიტის გადაცემა	416E-6	t _{txb}	20	C _{txb}
სენსორებზე სინჯის აქტივაცია	1.1	t _{data}	20	C _{data}

სადაც დენი მოცემულია ამპერში, ძაბვა ვოლტებში და დრო წამებში.

$$\text{ენერგია}_{TX} = 20 \times 10^{-3} \text{A} \times 3\text{V} \times 416 \times 10^{-6} \text{sec}/8\text{ბიტი} = 3.12 \mu\text{J}/\text{bit} \quad (2.6)$$

$$\text{ენერგია}_{RX} = 15 \times 10^{-3} \text{A} \times 3\text{V} \times 416 \times 10^{-6} \text{sec}/8\text{ბიტი} = 2.34 \mu\text{J}/\text{bit} \quad (2.7)$$

ჰეინზელმანის (Heinzelman) მოდელისაგან განსხვავებით ამ მოდელში გვხვდება 2 სიდიდის მიმდევრობა [24].

2.2.4 Mica2-ის სპეციალური მოდელის გაანალიზება რეალურ მონაცემებზე დაყრდნობით

შნეიდერმა (Shnayder) წარმოადგინა მონაცემები Mica2 პლატფორმის რეალურ მოდელზე დაყრდნობით [26]. მოდელის პარამეტრების მნიშვნელობები ნაჩვენებია ცხრილში 4.

ცხრილი 4. დენის მოხმარება რეალურ მონაცემებზე დაყრდნობით

მოწყობილობა	დენი	ოპერაცია	დენი
პროცესორი (CPU)		მირების ოპერაცია	
აქტიური	8.0 mA	RX	7.0 mA
ცდის რეჟიმი	3.2 mA	TX (-20 dBm)	3.7 mA
ADC ხმაური	1.0 mA	TX (-19 dBm)	5.2 mA
შემცირება			
ენერჯის გათიშვა	103 μ A	TX (-15 dBm)	5.4 mA
ენერჯის შენახვა	110 μ A	TX (-dBm)	6.5 mA
მზადყოფნის რეჟიმი	216 μ A	TX (-dBm)	7.1 mA
გახანგრძლივებული მზადყოფნის რეჟიმი	223 μ A	TX (dBm)	8.5 mA
შიდა ოსცილატორი	0.93 mA	TX (+dBm)	11.6 mA
LED-ბი	2.2 mA	TX (+dBm)	13.8 mA
სენსორის პლატა	0.7 mA	TX (+dBm)	17.4 mA
EEPROM წვდომა		TX (+10 dBm)	21.5 mA
წაკითხვა	6.2 mA	-	-
წაკითხვის დრო	565 μ წმ	-	-
ჩაწერა	18.4 mA	-	-
ჩაწერის დრო	12.9 მწმ	-	-

ცხრილში ნაჩვენებია მნიშვნელობები გამოთვლილია დამოუკიდებლად. მოხმარებული დენის ჯამური მნიშვნელობა მიღებულია მოწყობილობის თითოეული კომპონენტის მიერ მოხმარებული დენის შეჯამებით. როგორც მაგალითი გვიჩვენებს, მოხმარებული ენერჯის გამოთვლა ხდება 1 ბიტი ინფორმაციის გადაცემა-მიღებაზე, რაც ასევე შეიცავს პროცესორის აქტიურ მდგომარეობას და რადიო მიმღების სიმძლავრეს. ამ ცდის მსვლელობისას არ მიუთითებიათ თუ რამდენი ბიტის გადაცემა-მიღებაზე ჩატარდა ექსპერიმენტი, ამიტომ შეგვიძლია პირობითად ვივარაუდოთ, რომ ბიტების იგივე რაოდენობა იყო გამოყენებული რაც წინა მოდელში. 2.5 მაგალითის მიხედვით 1 ბიტ ინფორმაციაზე დახარჯული ენერჯია შესაძლებელია გამოითვალოს როგორც:

$$\begin{aligned} \text{ენერგია}_{\text{TX}} &= (8 + 21.5) \times 10^{-3} \text{A} \times 3\text{V} \times 416 \times 10^{-6} \text{sec}/8\text{ბიტი} & (2.8) \\ &= 4.602 \mu\text{J}/\text{bit} \end{aligned}$$

$$\text{ენერგია}_{\text{RX}} = (8 + 7) \times 10^{-3} \text{A} \times 3\text{V} \times 416 \times 10^{-6} \text{sec}/8\text{ბიტი} = 2.34 \mu\text{J}/\text{bit} \quad (2.9)$$

მოდელი რომელიც აქ არის წარმოდგენილი საკმაოდ წააგავს მოდელს რომელიც წარმოდგენილია [27]. განსხვავება რომელიც მიღებულია 1 ბიტი მონაცემების გადაცემა-მიღებაზე შესაძლებელია გამოწვეული იყოს იმ ფაქტით, რომ პოლასტრეს (Polastre) არ აქვს დაზუსტებული გადაცემა-მიღებისთვის საჭირო ენერჯის რაოდენობა, ამიტომაც ეს ნაწილი განსხვავებულია [26]-თან შედარებით.

2.3 ექსპერიმენტში გამოყენებული პლატფორმის განხილვა

ექსპერიმენტის ჩატარება განხორციელდა Crossbow-ს სენსორული კვანძების გამოყენებით. შემდეგ სექციებში დეტალურად განვიხილავთ მოწყობილობის შემდეგი კომპონენტების მახასიათებლებს: ძირითად პლატას, მკვებავ ელემენტს, ერთჯერადს და გადამუხტვადს და ასევე შევხებით TinyOS პროგრამულ უზრუნველყოფას, რომელიც გამოიყენება სენსორული კვანძების პროგრამული ფუნქციონირებისათვის.

2.3.1 Crossbow-ს სენსორული კვანძები

როგორც აღვნიშნეთ ტესტირების საგანს წარმოადგენს Crossbow-ს სენსორული კვანძი, სახელწოდებით Mica2. Mica2-ის სენსორული კვანძი იგივე MPR400, ენერჯო მომარაგებას იღებს 2AA ელემენტის საშუალებით. Crossbow-ს მახასიათებლების მიხედვით, მოდულის ენერჯო მომარაგება ხდება მუდმივი ძაბვით, რომელიც მერყეობს 2.7-დან 3.3 ვოლტის ფარგლებში [8]. მოდულის ძირითადი შემადგენელი კომპონენტები გახლავთ ერთი Atmel Atmega 128L მიკროკონტროლერი და რადიო მიმღები [7]. ნახ 1 მოდულის ილუსტრირების საშუალებას გვაძლევს.

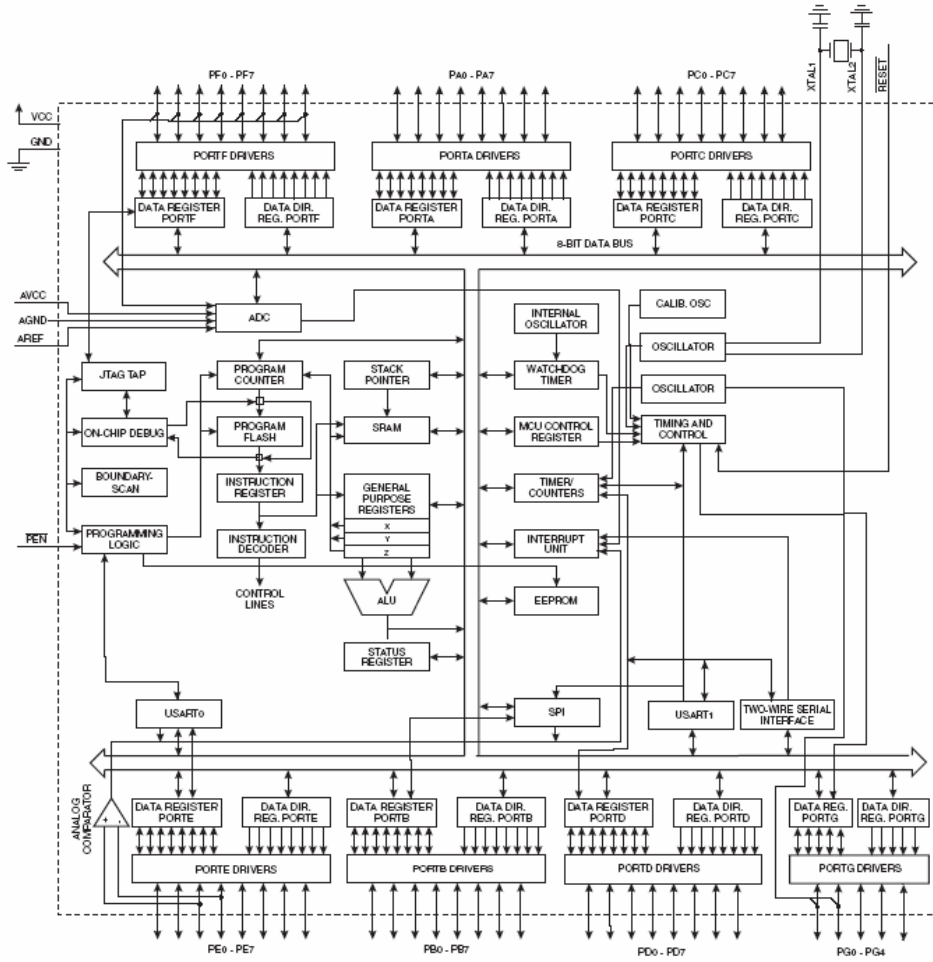


ნახ 1. MRP400 (Mica2)

128L წარმოადგენს 8-ბიტის RISC მიკროკონტროლერს 128 კბიტი პროგრამირებადი ფლემ მემორიებით, 4კბიტი EEPROM, 4კბიტი ჩაშენებული SRAM, ამასთან ასევე შეუძლია დამატებით 64 კბიტი გარე მემორიების ინტეგრირება. მიკროკონტროლერს აქვს ADC, 8 არხიანი 10ბიტი ნაკადებით და 8მგჰც სიხშირის პროცესორი [8], რომლის პროგრამირება შესაძლებელია UART ან JTAG ინტერფეისის საშუალებით. სატესტო სცენარში Mica2 კონტროლერის პროგრამირება მოხდა UART პორტის საშუალებით, MIB510 ცენტალური პლატის მოდულით. ნახ. 2 ნაჩვენებია [9] მიკროკონტროლერის სტრუქტურულ სქემა, რომელიც შედგება:

- 6 ორმხრივი 8 ბიტის პორტითა და 1 ორმხრივი 5 ბიტის პორტით;
- ორი USART (Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter) პორტი, სერიული კავშირისათვის.
- 32 ზოგადი გამოყენების რეზისტორი;
- ერთი რეალური დროის მზომი და ოთხი პროგრამირებადი დროის მთვლელ-მზომი;
- ერთი ბიტის მიმდევრობითი სერიული ინტერფეისი;
- ერთი 8 არხიანი, 10 ბიტის ADC;
- პროგრამირებადი დროითი ფუნქციონალი ჩაშენებული ოსცილატორით;
- ერთი SPI სერიული პორტი, IEEE 1149.1

სტანდარტიზირებული და თავსებადი JTAG სატესტო ინტერფეისთან.

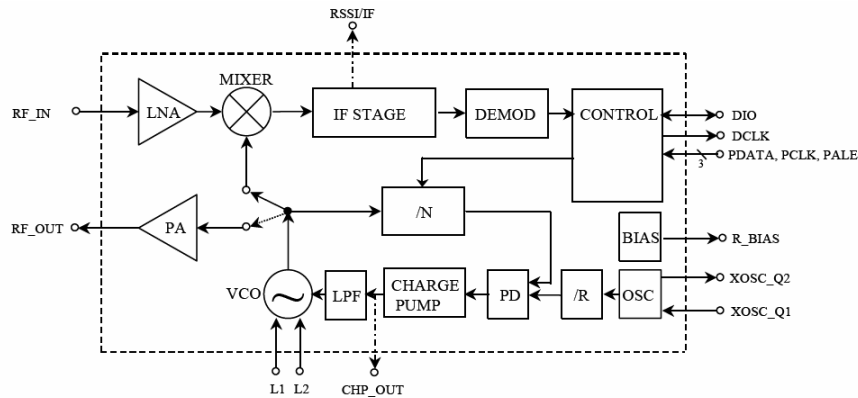


ნახ 2. ATMEL ATMEGA 128L მიკროკონტროლერის სტრუქტურული სქემა

პროცესორისა და რადიო-მიმღების ჩართვა გამორთვა მუდმივ რეჟიმში მიმდინარეობს, რომ მიღწეულ იქნას ენერგო დანახარჯების მინიმიზაცია. მიუხედავად იმისა, რომ ეს პროცესი ელემენტის სამუშაო ციკლს ახანგრძლივებს, იგი ამცირებს მის მოცულობას დენის ნაკადების გამო [8].

რადიო-მიმღების ძირითადი ნაწილი შედგება ინტეგრირებული წრედისაგან, Chipcon CC1000. MPR400 - პლატაზე CC1000 ოპერირებს 902-928მგჰც სიხშირულ დიაპაზონში. პროგრამულ უზრუნველყოფას, რომელიც აკონტროლებს CC1000 შეუძლია 54 არხიდან ერთ-ერთის შერჩევა 50კჰც ინტერვალებით. CC1000-ის მოდულაციის ოპერაცია ფიქსირებულია და

იყენებს ორობით FSK კოდირებას, შერჩეულს მანჩესტერის ან NRZ კოდირებით [5]. გადაცემის სიმძლავრე კონტროლირდება პროგრამულად, მაქსიმალური მნიშვნელობით 5dBm. ნახ. 3 ნაჩვენებია CC1000-ის სტრუქტურული დიაგრამა [5].



ნახ 3. CC1000-ის სტრუქტურული დიაგრამა

ნახ. 3 წარმოდგენილი თითოეული დიაგრამის ნაწილი რეალურ მოწყობილობებში გამოიყენება. სიგნალის მიღება ხდება ანტენის საშუალებით, რომლის გატარებაც ხდება დაბალი ხმაურის გამაძლიერებელში (LNA) და ტრანსფორმირდება შუალედურ სიხშირულ ზოლად მიქსერის საშუალებით. IF Stage-ფაზაში ხდება სიგნალების გაძლიერება და ფილტრაცია. ამის შემდეგ სიგნალის იგზავნება დემოდულატორში (DEMOM) და დემოდულირებული ინფორმაცია მიეწოდება DIO pin კონტაქტს, რომელიც თავისმხრივ უკავშირდება CPU-ს. სიგნალის გასაგზავნად, DIO pin კონტაქტიდან წამოსული ბიტების ნაკადი მოდულირდება სიხშირული მანიპულაციით და მიეწოდება გადამცემს. ძაბვით კონტროლირებადი ოსცილატორის (VCO) გამოსასვლელი უკავშირდება სიმძლავრის გამაძლიერებელს (PA). ასევე ბიტების ნაკადი გაივლის სიხშირის სინთეზატორს მიქსერზე სიგნალის მისადაგებისთვის. სინთეზატორი ჩამენებულია კრისტალის ოსცილატორი (XOSC) ფაზის დეტექტორში (PD), ე.წ. მუხტის გამაძლიერებელში (ბუსტერში), VCO-ში და ორ სიხშირის გამყოფში (/R და /N)[5].

2.3.2 მრავალჯერადი (გადამუხტვადი) ელემენტები

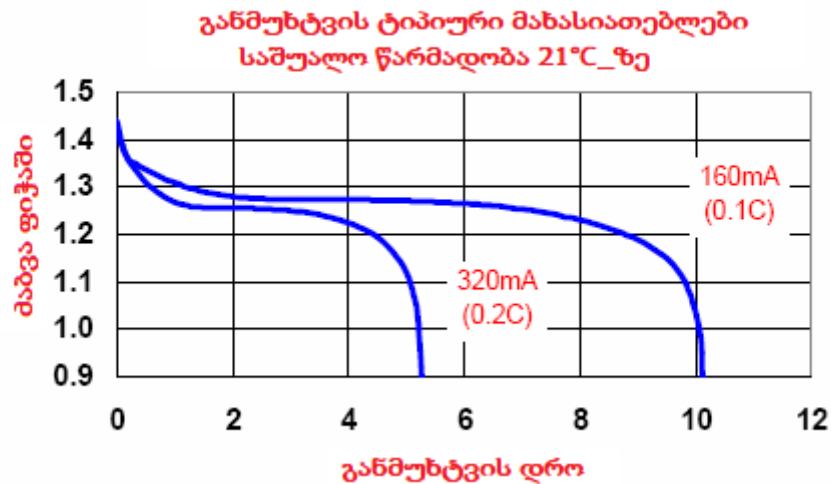
ექსპერიმენტში გამოყენებულია მეტალჰიდრატ-ნიკელის ტიპის მრავალჯერადი ელემენტები. ამ ექსპერიმენტის მსვლელობის დროს მიზანშეწონილად მიჩნეული იქნა მრავალჯერადი ელემენტების გამოყენება, რადგანაც ექსპერიმენტის გამეორება მრავალჯერადად ხორციელდება და იგი მიმდინარეობდა მანამ სანამ ელემენტი საბოლოოდ არ განიმუხტებოდა. თუმცა, ექსპერიმენტის მსვლელობისას ასევე გამოყენებული იყო ერთჯერადი AA ტიპის ელემენტებიც 2.75Vdc მუდმივი ძაბვით. სენსორული კვანძის მუშაობის ფუნქციონალი როგორც მრავალჯერად ასევე ერთჯერადი ელემენტების შემთხვევაში ერთნაირი იყო. ყველა ელემენტს აქვს ძაბვის ნომინალური მნიშვნელობა და დამუხტვის ნომინალური მნიშვნელობა (C). ჩვეულებრივ ეს ინტერპრეტირდება თუ რამდენი ამპერის გაცემა შეუძლია ელემენტს ერთი საათის განმავლობაში. თუ ჩავთვლით, რომ C=1200mAh ელემენტს შეეძლება გასცეს 1.2 ამპერის ექვივალენტი (1200mA) ერთი საათის განმავლობაში. ჯოულის ექვივალენტური მნიშვნელობა იქნება:

$$\text{ენერგია (ჯოული)} = \text{დენი} \times \text{1სთ} \times 3600 \text{წმ} / \text{1სთ} \times V; \quad (2.10)$$

$$\text{ენერგია (ჯოული)} = 1200 \text{mA} \times \text{1სთ} \times 3600 \text{წმ} / \text{1სთ} \times 1.2 \text{V} = 5184 \text{ჯოული}.$$

შემდეგი პარამეტრი რომელიც NiMH მრავალჯერად ელემენტს განასხვავებს იმ ელემენტებისაგან, რომლებიც რეკომენდირებულია Crossbow-გან, არის NiMH ელემენტების ძაბვის ნომინალური მნიშვნელობა 1.2 ვოლტი [5, 12]. იმ შემთხვევაში თუ კი ორი ასეთი ელემენტისაგან ძაბვას მივაწვდით სენსორულ კვანძს, რაც ჯამურად იქნება 2.4 ვოლტი, საკმაოდ მცირეა იმასთან შედარებით რისი რეკომენდაციაც Crossbow-ს აქვს გაცემული. თუმცა ექსპერიმენტიდან გაირკვა, რომ თუ კი ელემენტი ბოლომდეა დამუხტული, ხშირ შემთხვევაში 1.3 და 1.4 ვოლტის გაცემა შეუძლია რაც უკვე უახლოვდება სპეციფიკაციით განსაზღვრულ ოპტიმალურ მნიშვნელობას.

სხვა მნიშვნელოვანი პარამეტრი რომელიც ელემენტს აქვს არის განმუხტვის მრუდის მნიშვნელობა. ექსპერიმენტში გამოყენებული ელემენტების ტექნიკურ დოკუმენტაციაში ასეთი პარამეტრი განსაზღვრული არ არის, თუმცა ნახ. 4 გვიჩვენებს ამავე მწარმოებლის მსგავსი ელემენტის განმუხტვის მრუდს [12].



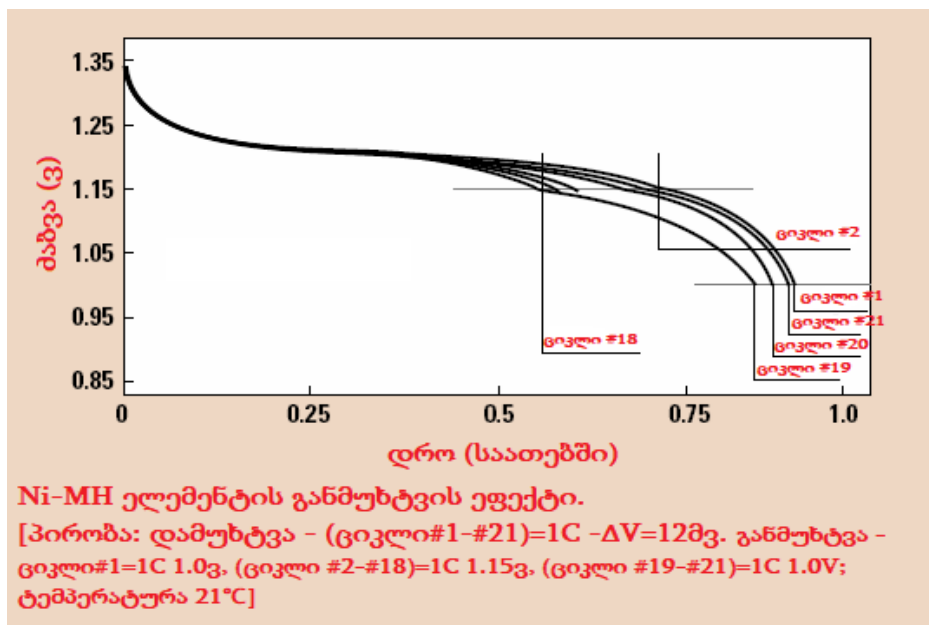
ნახ 4. Energizer NH15-ის განმუხტვის მრუდი

მრუდში ნაჩვენებია ერთი AA NiMH ტიპის ელემენტი 1600mA, 1.2V ძაბვის ნომინალური მნიშვნელობით. ექსპერიმენტში გამოყენებული ელემენტების მნიშვნელობა შეადგენს 1200mA-ს, ჯამში 2500mA. ნახაზი გვიჩვენებს, რომ სრულად დამუხტული ელემენტების შემთხვევაში, თავდაპირველ ეტაპზე შეინიშნება მრუდის მკვეთრი დახრილობა. აღწევს მრუდი თავის წრფივ მნიშვნელობას, მაშინ როდესაც მოწყობილობა ნორმალურ ოპერირებად რეჟიმზე გადავა, ძაბვის დაახლოებითი მნიშვნელობა თითოეულ ელემენტზე შეადგენს 1.28 ვოლტს, რაც ძაბვის ნორმალურ მნიშვნელობას უახლოვდება.

2.3.2.1 ძაბვის უკამრისობა

იმ შემთხვევაში როდესაც ელემენტები სწორ დამუხტვის პროცესს არ გაივლიან, ისინი განიცდიან ფენომენის ზემოქმედებას სახელწოდებით

„მეხსიერების ეფექტი“, რომელიც ტექნიკურად ცნობილია, როგორც ძაბვის უკმარისობა. ფენომენი გულისხმობს ძაბვის ვარდნას და მუხტის ტევადობის უნარის დაკარგვას, რაც წარმოიქმნება ელემენტის რამდენიმეჯერ სრულად დამუხტვა-განმუხტვის შემთხვევაში. მიუხედავად იმისა, რომ NiCd ელემენტები ამ ეფექტის გავლენის ქვეშ უფრო ხშირად ექცევიან ვიდრე სხვა ტიპის ელემენტები, ზოგჯერ ეს ეფექტი ვლინდება NiMH ტიპის ელემენტებშიც. ზოგიერთ ელემენტს ამ პროცესისგან აღდგენა შეუძლია რამდენიმე ციკლიანი სრული დამუხტვა-განმუხტვის შემდეგ. სენსორული კვანძების სასიცოცხლო ციკლში ამ ეფექტს ორ პროცესთან მიყავართ: პირველი, სენსორული კვანძისათვის მიწოდებული ძაბვის მნიშვნელობა შესაძლოა საჭირო ზღვარზე ნაკლები აღმოჩნდეს და მეორე, ელემენტმა იმაზე ნაკლები შესაძლო ენერჯია შეინახოს, რაც შეუძლია. ამ პრობლებიდან თუნდაც ერთ-ერთის განხორციელება სენსორული კვანძის სასიცოცხლო პერიოდს ამცირებს. ნახ. 5 ნაჩვენებია ძაბვის უკმარისობა [13, 14]:



ნახ 5. ძაბვის უკმარისობა Ni-MH ტიპის ელემენტში

2.3.3 TinyOS

Crossbow-ს სენსორული კვანძები წარმოადგენენ ღია პლატფორმას რომელთა პროგრამირება შესაძლებელია TinyOS პროგრამული

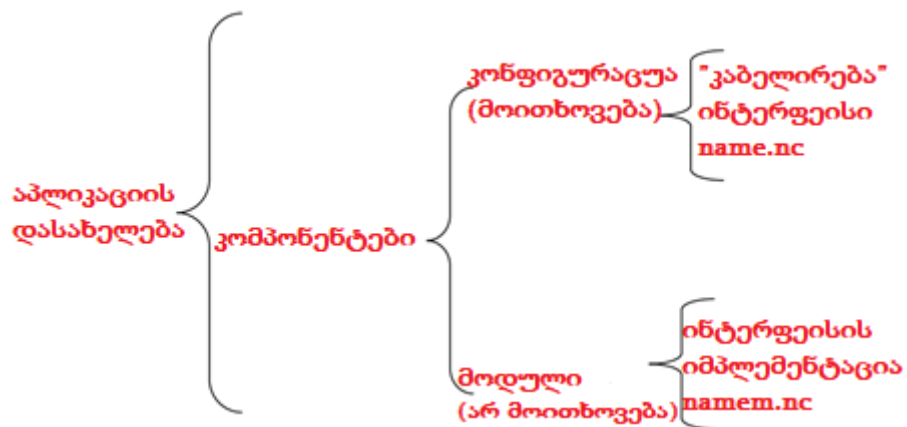
უზრუნველყოფის საშუალებით. ეს ოპერაციული სისტემა სპეციალურად შეიქმნა ისეთი მოწყობილობებისათვის რომელთა მეხსიერების რესურსები, გამოთვლითი შესაძლებლობები და ა.შ. შეზღუდულია. როგორც ეს უსადენო სენსორული ქსელების შემთხვევაში გვხვდება [7].

TinyOS განსხვავდება სტანდარტული ოპერაციული სისტემისაგან რამდენიმე ნიშანდობლივი პარამეტრით:

- TinyOS-ში ნებადართულია მხოლოდ ერთი აღმასრულებელი ფაილის ატვირთვა, რომელიც შესაბამისად მხოლოდ ერთი პროცესის გაშვებასა და მომსახურებას გულისხმობს. აპლიკაცია შედგება განრიგების მინიჭებისა და რამდენიმე დამატებითი ფუნქციონალისაგან რომელთა ჩატვირთვასაც ახორციელებს აღმასრულებელ ფაილში;
- TinyOS აქვს მოვლენებზე ფოკუსირებადი არქიტექტურა და კომბინირებული ფუნქციონალი ამოცანისა და მოვლენის ერთობლივ შესასრულებაზე [34]. ამოცანები წარმოადგენენ პრიორიტეტულ ფუნქციონალს. მოვლენები შეადგენენ მოწყობილობიდან მოსულ სიგნალს ამა თუ იმ ამოცანის საპასუხოდ რაზეც ოპერაციული სისტემა აგებს პასუხს [7];
- TinyOS-ში არ არის გამოყოფილი ცალკე სივრცე და იგი ჩაშენებულია გამოთვლითი რესურსების ბირთვში [16];
- TinyOS იყენებს მხოლოდ ერთ საერთო სტეკს [16].

TinyOS-ის პროგრამირების ენას წარმოადგენს nesC [15], რომელიც C პროგრამირების ენის ერთ-ერთი ფორმაა [15]. TinyOS-ში შესაძლებელია ამ პროგრამირების ენის მზა ბიბლიოთეკების ჩაშენება, რომელთა შემდგომი ცვლილება ან მოდიფიცირებაც შესაძლებელია, რომ ამა თუ იმ აპლიკაციას, სამუშაოს ან მოთხოვნას მოერგოს. TinyOS-ის ყველა აპლიკაციაში საერთო ჯამში გვხვდება მხოლოდ ორი კომპონენტი, ესენია: მოდულები და კონფიგურაციები. კონფიგურაციები აღწერენ თუ როგორ უნდა უკავშირდებოდნენ კომპონენტები ერთმანეთს, ეს პროცესი ცნობილია

„კაბელირების“ სახელწოდებით. თითოეულ აპლიკაციას უნდა ჰქონდეს სულ ცოტა ერთი კონფიგურაცია მაინც, რომლის კოდიც ჩაშენდება ამა თუ იმ მოდულში. მოდულში ჩაშენებულ კოდს შეუძლია ასევე ამა თუ იმ ინტერფეისის მართვაც. გასათვალისწინებელია, რომ აპლიკაციისთვის მოდულის არსებობა აუცილებელი პირობა არ არის. ინტერფეისში როგორც ასეთი, მზა კოდი არ არის ჩაშენებული თავიდან, რომლის თავდაპირველი მდგომარეობა C პროგრამირების ენის ფუნქციის მსგავსია [7]. ნახ. 6 TinyOS-ის მუშაობის სტრუქტურულ სქემას გვიჩვენებს.



ნახ 6. TinyOS-ის აპლიკაციის მუშაობის სტრუქტურული სქემა

ნახ. 6-ზე ნაჩვენები აპლიკაციის სქემას მარტივად „სახელს“ (ინგლ. Name) უწოდებენ. აპლიკაციას „სახელს“ აქვს ერთი მნიშვნელოვანი კონფიგურაცია, და ეწოდება მას „name.nc“ და აქვს ერთი მოდული სახელწოდებით „namem.nc“. TinyOS-ში კომპონენტებს მომხმარებლისაგან შესაძლებელია ნებისმიერი დასახელების მინიჭება, მაგრამ კონფიგურაციის დასახელება აუცილებლად უნდა იყოს „name“ რომლის ფორმატიც არის .nc, ხოლო მოდულის დასახელება უნდა მთავრდებოდეს m-ით რომლის ფორმატიც ასევე არის .nc [35].

2.4 სენსორულ ქსელში გამოყენებული MAC დონის პროტოკოლი

მრავალი პროტოკოლის განხილვა განხორციელდა სენსორული ქსელების MAC დონეზე გამოსაყენებლად. ჩვენ შევხებით ზოგიერთ ფართოდ

გავრცელებულ პროტოკოლს, მათ შორის იმასაც რომელიც ჩვენი პროცესების განხორციელებისათვის გამოვიყენეთ. MAC დონის ყველა პროტოკოლს თავისი დადებითი და უარყოფითი მხარეები აქვს, და როგორც ასეთი არ არის ზოგადი შეთანხმება თუ რომელი პროტოკოლია ოპტიმალური სენსორული ქსელებისათვის. ზოგიერთი პროტოკოლი კარგად ერგება აპლიკაციის და მისი პროგრამული მხარის მუშაობას, ზოგიერთი სხვებთან შედარებით უკეთესად ანაწილებს ენერგეტიკულ რესურსებს, ხოლო ზოგიც უკეთესია სიმულაციებისათვის. ამიტომ ჩვენ განხილავთ სენსორული ქსელების MAC პროტოკოლების ზოგად კონცეფციას, მათი მუშაობის მეთოდოლოგიასა და მათ ინტერაქციას გადაცემის პროტოკოლებთან.

2.4.1 CSMA_ზე დაფუძნებული MAC პროტოკოლი

CSMA-ში სატრანსპორტო კვანძი ელის MAC ნებართვას მანამ სანამ გადასცემს ინფორმაციას [20]. ამ პროტოკოლის სხვადასხვა ვარიანტი გამოყენებულია სადენიან და უსადენო ქსელებში [22]. Woo et. al-ის მიერ შემოთავაზებულ სქემაში განიხილება მუდმივი მზადყოფნის რეჟიმის პერიოდი და პერიოდული დაყოვნებები, კოლიზიის ალბათობების მაქსიმალური შემცირებისათვის (კოლიზიებისგან თავის არიდების პრცესი) [22]. ზოგადად CSMA პროტოკოლი გვიჩვენებდ მოკლე პერიოდიან დაყოვნებას და მუშაობის კარგ რეჟიმს დაბალი ტრაფიკის არსებობის შემთხვევაში. თუმცა, როდესაც ტრაფიკი იზრდება, კოლიზიის ალბათობაც იზრდება, ხოლო CSMA პროტოკოლის ეფექტიანობა მცირდება [20]. CSMA/CA წარმოადგენს MAC პროტოკოლს რომელიც ჩვენს მიერ არის გამოყენებული სატესტო სცენარებში.

2.4.2 თვით-ორგანიზებადი MAC პროტოკოლი სენსორული ქსელებისათვის (SMACS)

SMACS პროტოკოლის მიხედვით, მოწყობილობები იწყებენ მეზობელი კვანძების აღმოჩენის პროცესს და ამავე დროს იწყებენ განრიგების

მინიჭებას მიღება-გადაცემის პროცესის განსახორციელებლად [18]. მეზობელთან კავშირის პროცესში სენსორული კვანძი ირჩევს ორ დროით ზოგად სლოტს ფიქსირებულ სიხშირეზე. ამისათვის სრული ქსელის სინქრონიზაცია არ მოითხოვება, მაგრამ აუცილებელ პირობას წარმოადგენს მეზობელ კვანძებს შორის სინქრონიზაცია. სინქრონიზაცია მიიღწევა მეზობლებს შორის სულ ცოტა 6 შეტყობინების მიმოცვლის შედეგად. პროტოკოლის ფუნქციონალის მიხედვით ყველა მეზობელმა კვანძმა უნდა გაითვალისწინოს სხვა დანარჩენი კვანძების განრიგის ცხრილები [18]. [3]-ის მიხედვით, SMACS-ის მთავარ უპირატესობას წარმოადგენს ის, რომ ქსელს არ ესაჭიროება როგორც მმართველი კვანძი, ასევე ქსელის სრული სინქრონიზაცია. უარყოფითი მხარეა ინფორმაციული თავსართი რომელიც კვანძებს ესაჭიროება ურთიერთ შორისი კავშირისათვის, რომელიც შეიცავს როგორც სასარგებლო ინფორმაციას, ასევე ინფორმაციას მეხსიერებაზე და გამოთვლით შესაძლებლობებზე.

2.4.3 ჰიბრიდული TDMA/FDMA მეთოდი

განსახილველი სქემა გულისხმობს, რომ სენსორული კვანძები განლაგებულია მაღალი სიმძლავრის ცენტრალური სადგურის ახლო დაფარვის არეალში (არა უმეტეს 10 მეტრის რადიუსში). ამ მოდელის მთავარი იდეა მდგომარეობს ქსელის ჯამური მოხმარებული სიმძლავრის შემცირება და არხების ოპტიმალური რაოდენობის შერჩევა, რომლებიც თანაფარდობაში იქნება გადამცემისა და მიმღების მოხმარებულ სიმძლავრესთან. იმ შემთხვევაში თუ გადამცემს აღენიშნება სიმძლავრის მაღალი მნიშვნელობა, მიზანშეწონილია TDMA-ს გამოყენება. სხვა შემთხვევაში FDMA-ს გამოყენებაა რეკომენდირებული [19]. [20] მიხედვით, ამ სქემის ერთ-ერთ უპირატესობას წარმოადგენს კოლიზიების არ არსებობა, იმიტომ რომ თითოეული დროითი სლოტი ან გატარების ზოლი მორგებულია თითოეულ სენსორულ მოწყობილობაზე ინდივიდუალურად. უარყოფით მხარეებს მიეკუთვნება დაფარვის სივრცის მცირე რადიუსი (დაახლოებით 10 მეტრი) და რესურსების არა ოპტიმალური ხარჯვა მაშინაც

კი, როდესაც სენსორულ კვანძს გადასაცემი არაფერი აქვს და იგი ინფორმაციას მაინც აგზავნის.

2.5 სენსორულ ქსელებში გამოყენებული გადაცემის პროტოკოლები

სენსორული ქსელის ოპტიმალური მუშაობისათვის შემოთავაზებულია გადაცემის სხვადასხვა პროტოკოლები. GSP პროტოკოლი, რომელიც ჩვენ გამოვიყენეთ, დაფუძნებულია დაფარვის კონცეფციაზე.

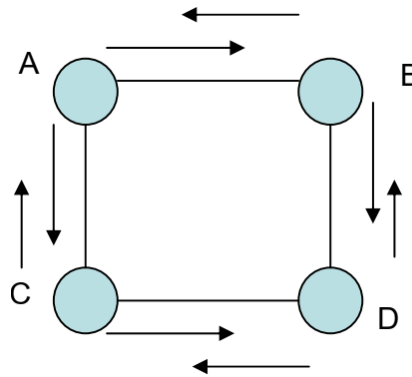
2.5.1 დაფარვის კონცეფციის მიმოხილვა

„დაფარვა“ წარმოადგენს მეთოდს, რომელიც თითოეულ მიღებულ პაკეტს აგზავნის ქსელში ყველა სენსორული კვანძის მიმართულებით [20]. ეს მეთოდი იყენებს გამეორების ციკლებს, ანუ როდესაც პაკეტს არ განუხორციელებია მაქსიმალური ბიჯი სენსორულ მოწყობილობამდე [3]. ამის განსაზღვრა შესაძლებელი გახდა დამისამართების სქემის გამოყენებით. „დაფარვა“ წარმოადგენს მარტივ ალგორითმს, თუმცა ასევე აღენიშნება გარკვეული დეფექტური მხარეებიც, სენსორულ ქსელებში განხორციელების შემთხვევაში, კერძოდ:

- იმპლოზია: დუბლიკატი შეტობინება ეგზავნება ერთი და იგივე კვანძს;
- გადაფარვა: თუ კი ორი კვანძი ერთი და იგივე დაფარვის არეალშია, შესაძლებელია ერთი და იგივე სიგნალი ორივემ მიიღოს და გადასცეს ერთი და იგივე ინფორმაცია ორჯერ;
- რესურსებზე მონიტორინგის შეუძლებლობა: დაფარვის მეთოდი არ აკონტროლებს მოწყობილობების ენერგეტიკულ რესურსებს, ამიტომ ის ყველა მოწყობილობის შემთხვევაში ერთნაირად მუშაობს და კვანძებს ერთი და იგივე ამოცანას აკისრებს.

ნახ. 7 ამ ქსელის მუშაობის ილუსტრირების საშუალებას გვაძლევს, რომლის მიხედვითაც, B და C კვანძს შეუძლია A კვანძის „მოსმენა“ და პირიქით. D კვანძი C და B კვანძის დაფარვის ზონაშია. როდესაც A კვანძი გადასცემს ინფორმაციულ პაკეტს, B და D კვანძები იღებენ მას და ახდენენ

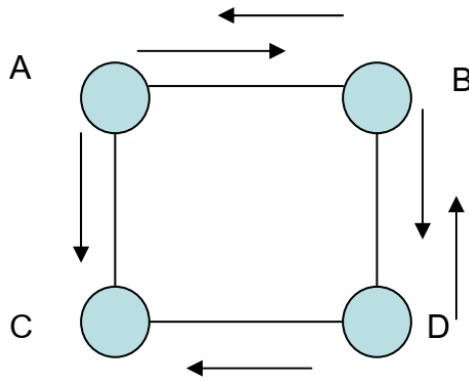
ხელახალ გადაცემას. რადგან A კვანძი ამ მოწყობილობების დაფარვის ზონაშია, იგი უკან მიიღებს თავის მიერ გაგზავნილ პაკეტს და ამ პაკეტის ხელახალ გადაცემას ისევ განახორციელებს. საბოლოო ჯამში პაკეტი ქსელს სრულად მოედება, მაგრამ ქსელში ასევე იმოდრავებს ამ პაკეტის დუბლიკატი მრავალი პაკეტი, ამიტომ ამ ალგორითმს გარკვეული გაუმჯობესებები ესაჭიროება.



ნახ 7. დაფარვის ალგორითმის მუშაობის მაგალითი

2.5.2 დიალოგზე ორიენტირებული პროტოკოლის მეთოდი

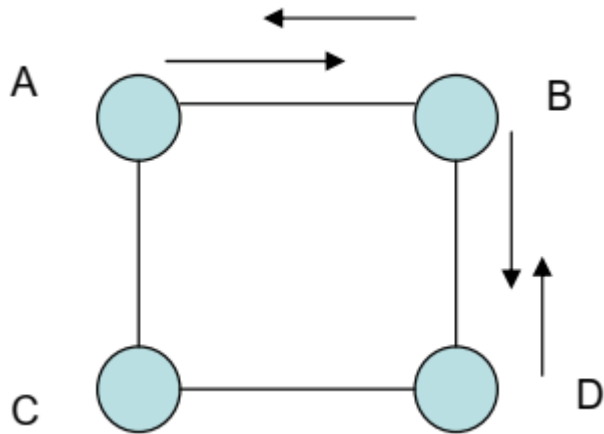
ეს მეთოდი ცდილობს დაფარვის მეთოდის გაუმჯობესებას, შემდეგი პროცედურების ხარჯზე: კვანძებს ენიჭება გადაცემის p ალბათობა, რომ მოახდინონ მიღებული ინფორმაციული პაკეტის გადაცემა. $1-p$ ალბათობის შემთხვევაში, მიღებული ინფორმაციული პაკეტის უკუგდება ხდება [25]. დიალოგის მეთოდი დაცულია იმპლოზიის პრობლემისაგან, მაგრამ დრო რაც ესაჭიროება ამ მეთოდს ინფორმაციის გადასაცემად დანიშნულების წერტილამდე, არის დიდი [3]. ასევე, ამ ალგორითმში არ გვხვდება აუცილებელი სინქრონიზაციის მოთხოვნები [3]. ანალოგიური ქსელის მაგალითი ნაჩვენებია მე_8 ნახაზზე. ნახაზის მიხედვით, A კვანძი იწყებს პაკეტის გადაცემას, შემდეგ p ალბათობით B კვანძი გადასცემს პაკეტს, ხოლო $1-p$ ალბათობით C კვანძი ახდენს პაკეტის უარყოფას. მას შემდეგ რაც პაკეტი მიაღწევს D კვანძამდე, ალბათობის ოპერაცია თავიდან იწყება და პროცესი მეორდება. აქვე გასათვალისწინებელია, რომ C კვანძმა დახარჯა ენერგია პაკეტის მიღებაზე, რომელიც $1-p$ ალბათობის მიხედვით უარყო.



ნახ 8. დიალოგის მეთოდის მაგალითი

2.5.3 GSP: დიალოგის მეთოდზე დაფუძნებული ძილის რეჟიმის პროტოკოლი უსქ-ის ენერგო ეფექტური მუშაობისთვის

ინფორმაციის გადაცემისათვის GSP იყენებს ე.წ. „მოვალეობის“ ციკლებს. მოვალეობათა ციკლის ერთ მხარეს არის გააქტიურებული რადიო არხი, ამ შემთხვევაში კვანძს შეუძლია ინფორმაციის მიღება-გადაცემა. იგულისხმება, რომ p ალბათობისათვის, რადიო სიხშირე გაითიშება, რა შემთხვევაშიც კვანძი ვეღარ შეძლებს პაკეტების მიღება-გადაცემას. როდესაც კვანძი იღებს ინფორმაციულ პაკეტს, მან მისი გადაცემაც უნდა განახორციელოს [1]. ნახ. 9 GSP მეთოდის გამოყენების ილუსტრირების საშუალებას იძლევა. ამ შემთხვევაში A იწყებს გადაცემას. ჩავთვალოთ, რომ B კვანძის რადიო მიმღები აქტიურია, ხოლო C კვანძის დეაქტივირებულია, ამ შემთხვევაში B მოახდენს პაკეტების როგორც მიღებას ასევე მათ გადაცემას. C არ დახარჯავს ენერგიას პაკეტების მიღება-გადაცემაზე. D კვანძის მიიღებს პაკეტებს მხოლოდ მაშინ თუ კი მისი რადიო მიმღები აქტიური იქნება და ასევე მოახდენს მიღებული პაკეტების გადაცემას.



ნახ 9. GSP ალგორითმის მაგალითი

თავი 2_ის შედეგები

მოცემულია სენსორის განმარტება. განხილულია ენერგო-მოხმარების დაზოგვის რამდენიმე ექსპერიმენტული მოდელი როგორც არის: ენერგიის მოხმარების კლასიკური მოდელი, μ AMPS სპეციალური მოდელი, Mica2, სპეციალური მოდელი, Mica2-ის სპეციალური მოდელის გაანალიზება რეალურ მონაცემებზე დაყრდნობით. ექსპერიმენტის საშუალებით გაანალიზდა 1 ბიტ ინფორმაციაზე დახარჯული ენერგიის რაოდენობა.

განხილულია ასევე ექსპერიმენტში გამოყენებული პლატფორმა. განხილულია სენსორულ კვანძებთან სამუშაო პროგრამული ოპერაციული სისტემა სახელწოდებით TinyOS, რომელიც სპეციალურად შეიქმნა ისეთი მოწყობილობებისათვის რომელთა მეხსიერების რესურსები და გამოთვლითი შესაძლებლობები შეზღუდულია.

თავი 3. ექსპერიმენტული სამუშაოს მიმდინარეობა

ექსპერიმენტის მიზანს წარმოადგენდს ქსელის მუშაობის დროის გაზომვა და განსაზღვრა თუ რა დრო იქნება საჭირო პირველი კვანძის მწყობრიდან საბოლოოდ გამოსასვლელად. ექსპერიმენტალური ქსელი აგებული იქნა სტუქს მე_8 კორპუსის მე_5 სართულზე, ტელეკომუნიკაციის დეპარტამენტის ტერიტორიაზე.

3.1 გამოყენებული მოწყობილობები

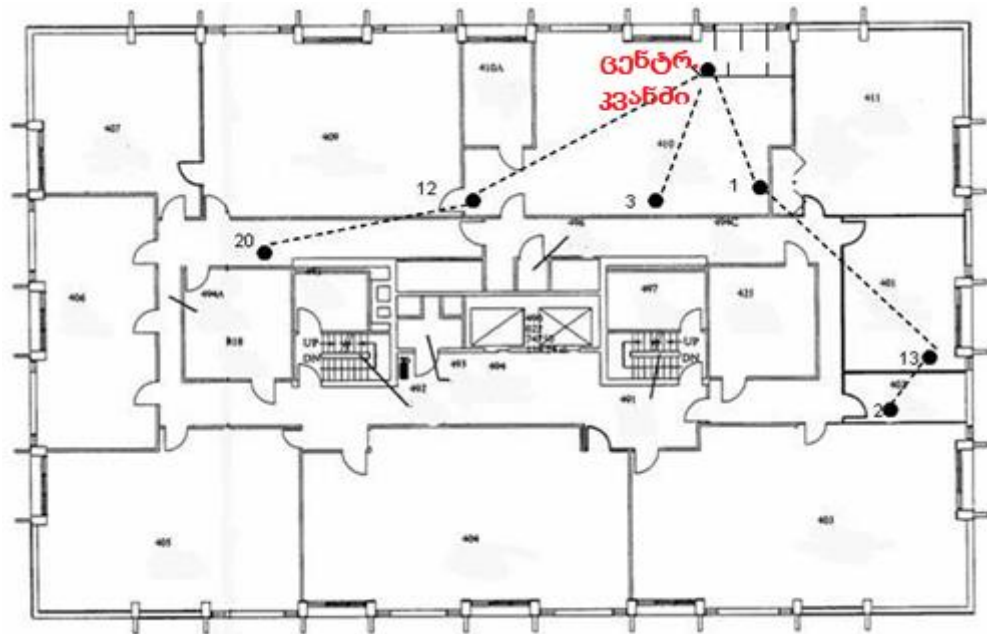
ქსელი რომელიც ექსპერიმენტის მსვლელობისათვის შევიმუშავეთ შედგება ექვსი სენსორული კვანძისა და ერთი მმართველი ცენტრალური კვანძისაგან. თითოეული კვანძის მოდელი არის Crossbow Mica2 ტიპის, აღჭურვილები მრავალჯერადი გამოყენების AA ტიპის ელემენტებით, კერძოდ Energizer Accu Rechargeable, 1200mA@1.2V NiMH ტიპის ელემენტები. შემდგომში ასევე გამოვიყენეთ Mercury Rechargeable NiMH ტიპის ელემენტები, 2500mA@1.2V. თითოეული ექსპერიმენტი ტარდებოდა მხოლოდ ერთი ტიპის ელემენტებისათვის.

Mica2-ის სენსორის პლატა იყენებს 0.7mA-ს, CPU-ს აქტიურ მდგომარეობაში ესაჭიროება 8.0mA, ხოლო რადიო მიმღების მოხმარება ცვალებადია და მოთავსებულია 3.7_დან 21.5mA_ის ინტერვალებში [26]. ექსპერიმენტის მიზანს წარმოადგენს სენსორული კვანძის ენერჯის მოხმარების გამოთვლა კავშირის პროტოკოლებში, უშუალოდ „სენსორის“ მიერ გამოყენებული ენერჯია ძალზედ მცირეა ამიტომ მისი მოხმარების მნიშვნელობა უგულებელყოფილია.

3.2 სამუშაო არეალი

განლაგების სქემა შემუშავდა შემდეგნაირად: განთავსდა ექვსი სენსორული კვანძი, რომელთაგან სამს საშუალება აქვს პირდაპირი კავშირი განახორციელოს მმართველ ცენტრალურ კვანძამდე, როლო დანარჩენ სამს პირდაპირი კავშირის განხორციელების შესაძლებლობა არ აქვს და კავშირის განსახორციელებლად იძულებულია გამოყენოს არაპირდაპირი

საშუალებები, მაგ. სხვა მსგავსი სენსორული კვანძები. ამ გზით, საშუალება მოგვეცემა GSP მეთოდი გავანალიზოთ და დაკვირვება მოვახდინოთ ქსელში მოძრავ ინფორმაციულ პაკეტებზე, რადგან ყველა ინფორმაციული შეტყობინება საბოლოოდ ცენტრალურ მმართველ კვანძში რეგისტრირდება. საწყის ეტაპზე განხორციელდა დაფარვის არეალის ტესტირება. ნახ. 10 გვიჩვენებს შერჩეულ ადგილმდებარეობებს, გამოყენებული სენსორული კვანძების განლაგებასა და მათი კავშირის სქემებს.



ნახ 10. კვანძების განლაგება და კავშირის სქემა

კვანძები 0 (მმართველი), 1, 3 და 12 განთავსებულები არიან უსადენო ლაბორატორიაში. დანარჩენები განლაგებულნი არიან შემდეგნაირად: კვანძი №2 განთავსებულია 502 ოთახში, რომელიც განკუთვნილია სწავლა დამთავრებული სტუდენტებისათვის; კვანძი №13 განთავსებულია 501 ოთახში, PhD სტუდენტთა მოსასვენებელში, კვანძი №20 განთავსებულია 24 საცავში. კვანძები 1, 3 და 12 მმართველ კვანძთან კავშირს პირდაპირ ამყარებენ, ხოლო 2, 13 და 20 კვანძებმა მმართველ, ცენტრალურ კვანძამდე უნდა მიაღწიონ თავის მეზობელი კვანძების გავლით და ამისათვის გამოიყენონ GSP პროტოკოლი. კვანძი №20 განთავსებულ იქნა მეტალის საცავში, რომელიც მთელი ექსპერიმენტის მსვლელობის პერიოდში

დალუქულ მდგომარეობაში იმყოფება, თუმცა სტაბილურ კავშირს ამყარებდა №12 კვანძთან, ხოლო მისგან ინფორმაცია მიეწოდებოდა მმართველ კვანძს. ცხრილ 5_ში ჩამოთვლილია მანძილები თითოეული კვანძიდან მმართველ კვანძამდე.

ცხრილი 5. მანძილები თითოეული კვანძიდან მმართველ კვანძამდე

	კვანძი	მანძილი (მეტრი)
1	1	5,32
2	2	15,22
3	3	4,19
4	20	16,31
5	12	8,57
6	13	13,44

მმართველი კვანძის მოვალეობაში შედის ინფორმაციის მიღება ყველა სენსორული კვანძიდან და შემდგომ მისი გადაცემა მთავარ კომპიუტერზე. მთავარი კომპიუტერი თითოეული მიღებულ პაკეტს დაარეგისტრირებს და გაფილტრავს დროის, რიცხვის, რაოდენობისა და გამგზავნი კვანძის მიხედვით. ცხრილი 6 გვიჩვენებს მიღებული პაკეტების რეგისტრაციის მონაცემებს.

ცხრილი 6. ლოგირებული ინფორმაციული ფაილის მაგალითი

მიმღების მისამართი		ტიპი	ჯგუფი	სიგრძე	ინტერვალი	ინტერვალი	ინტერვალი	გადამცემ. მისამართი.	ინტერვალი	კომპიუტერი		ინტერვალი	ინტერვალი	ინტერვალი	თარიღი
7E	00	04	7D	0A	B2	67	7C	02	00	8B	75	34	29	40	შაბ. 2 იანვ 11:29:29
7E	00	04	7D	0A	B2	67	7C	0C	00	8B	7E	34	29	40	შაბ. 2 იანვ 11:29:33
7E	00	04	7D	0A	B2	67	7C	0C	00	8B	7F	34	29	40	შაბ. 2 იანვ 11:29:33
7E	00	04	7D	0A	4D	4D	4D	0C	1C	8B	81	A9	95	C7	შაბ. 2 იანვ 11:29:33

ცხრილის მიხედვით ინტერვალები და თარიღები შექმნილია მთავარი კომპიუტერის მიერ, მმართველი ცენტრალური კვანძიდან მიღებული ინფორმაციაზე დაყრდნობით.

3.3 სენსორულ ქსელებში გამოყენებული ფიზიკური დონის მახასიათებლები
განხილული მეთოდის მიხედვით კვანძები დაპროგრამებულია გადაცემაზე 903 მგჰც სიხშირეზე, სიმძლავრის მაქსიმალური მნიშვნელობით 5dBm და ორობითი მანიპულაციის FSK მეთოდზე, თანმდევი მანჩესტერის კოდირებით 19,2 kbps სიჩქარით.

3.4 სენსორული ქსელების MAC დონეზე გამოყენებული პროტოკოლი

ჩვენ ამ მეთოდის განხილვისას დავეყრდნობით Crossbow-ის მიერ შემოთავაზებულ საბაზისო პროტოკოლს CSMA/CA-ს. CSMA/CA მეთოდი გულისხმობს სენსორული კვანძის გადამცემი სიხშირის „მოსმენას“ ანუ თუ კი გადამცემი სიხშირე არამომუშავე რეჟიმშია გადასული, სენსორული კვანძი ელოდება მის აქტიურ ფაზაში გადასვლას. ხოლო, იმ შემთხვევაში თუ კი ამ პერიოდმა დააყოვნა, კვანძი აგზავნის მოთხოვნას მომსახურების თაობაზე. იმ შემთხვევაში თუ კი MAC დონეზე კავშირის გადაცემის ჩავარდნა მოხდება იგი დანაკარგების ასანაზღაურებლად კავშირს თავიდან არ დაამყარებს. ამიტომ რიგ შემთხვევებში წინამორბედი შეტყობინების გადაცემის ჩავარდნის გამო პრობლემები მომდევნო შეტყობინებასაც ექმნება და ხდება ასევე ამ შეტყობინების ჩავარდნაც რადგან ბუფერის მოდიფიცირება ვერ ხერხდება [34]. ნებისმიერ (კავშირის წარმატების ან წარუმატებლობის) შემთხვევაში შედეგის სიგნალი გადაეცემა ზედა დონის პროტოკოლს, რომელსაც შემდგომი რეაგირება ეკისრება.

რადგან Crossbow სენსორულ კვანძებში ჩაწერილია TinyOS ოპერაციული სისტემა, ამიტომ მისი კოდის მოდიფიცირება შესაძლებელია იმდენად რამდენადაც ექსპერიმენტის საჭიროება მოითხოვს. თუმცა, კოდის მოდიფიცირება GSP მეთოდმა არ მოითხოვა და ამიტომ ძირითადი ფორმატის გამოყენება საკმარისი აღმოჩნდა. ნახ. 11 გვიჩვენებს მონაცემთა გადაცემის არხის დონის ფრეიმის სტრუქტურას. გასათვალისწინებელია, რომ რადგან GSP მეთოდს არ აქვს დამატებითი თავსართი მონაცემთა

გადაცემის არხის დონეზე, ფრეიმის ფორმატი და პაკეტის ფორმატი (ქსელის დონეზე) იდენტურია.

Bytes	8	2	2	1	1	1	2	2	2
	Pream	Sync	DA	Type	Group	Length	Counter	SA	CRC

ნახ 11. ფრეიმის სტრუქტურა

- Pream შედგება 8 ბაიტისაგან იგივე პრეამბული. 8 ბაიტი წარმოადგენს გამეორებას $0 \times AA$ (10101010) ან 0×55 (01010101). აქ, $0 \times AA$ მიმდევრობა გამოყენებულ იქნა [6] მიხედვით.
- Sync, წარმოადგენს სინქრონიზაციის 2 ბაიტს. რომელიც არის $0 \times 33CC$.
- DA, წარმოადგენს დანიშნულების მისამართს. ჩვენ ექსპერიმენტში მხოლოდ გადაცემის მისამართს ვიყენებთ (FFFF).
- Type, შეიცავს ინფორმაციას ფრეიმის ტიპზე და მსგავსია TCP/UDP ფორმატის, იმ თალსაზრისით თუ რა აპლიკაციისკენ უნდა იყოს ფრეიმი გადამისამართებული.
- Group, ველი წარმოადგენს კვანძების ჯგუფის იდენტიფიკატორს. Crossbow კვანძების გამოყენებით, შესაძლებელია კვანძების რამოდენიმე ჯგუფის შექმნა, რაც ასევე ამ კვანძების მისამართს წარმოადგენს. ექსპერიმენტში მხოლოდ ერთი ჯგუფი გამოვიყენეთ: ჯგუფი $0 \times 7D$ ან 125-ე ათობით სისტემაში.
- Length წარმოადგენს გაგზავნილი შეტყობინების სიგრძეს. ექსპერიმენტში გამოყენებული შეტყობინების სიგრძე შეადგენს 4 ბაიტს, რომელიც განაწილებულია შემდეგნაირად: პირველი ორი ბაიტი წარმოადგენს კონტეინერის მახასიათებელს. შემდეგი ორი ბაიტი შეიცავს ინფორმაციას გადამცემის შესახებ, ეს ინფორმაცია არის საწყისი გადამცემის მონაცემების შემცველი. ეს ოთხ ბაიტისანი მონაცემები გადაიცემა Little Ending ფორმატის სახით.
- ბოლო 2 ბაიტი წარმოადგენს CRC შემოწმებას, რაც მონაწილეობას ღებულობს ფრეიმის მიღების სისწორეში. აქ ასევე

გასათვალისწინებელია, რომ MAC დონე არ უარყოფს გადასაცემ ინფორმაციას ცუდი CRC-ის შემთხვევაში.

ფრეიმის ჯამური ზომა შეადგენს 21 ბაიტს.

გარკვეული პერიოდის შემდეგ კვანძი გადადის პასიური მდგომარეობიდან გადაცემის რეჟიმში. ამ პროცესს ესაჭიროება 250 მიკროწამი. გადაცემის შემდეგ კვანძი ისევ უბრუნდება მიღების მდგომარეობას. ამას დამატებით 250 მიკროწამი ესაჭიროება. ამ პროცესის აღსაწერად გამოიყენება ნახ. 12-ზე ნაჩვენები დროითი ფრეიმის სტრუქტურა.

დრო(მლწმ)	6	0,25	9	0,25
	პასიური მდგომარეობა	გადართვა TX	შეტყობინების დრო	გადართვა RX

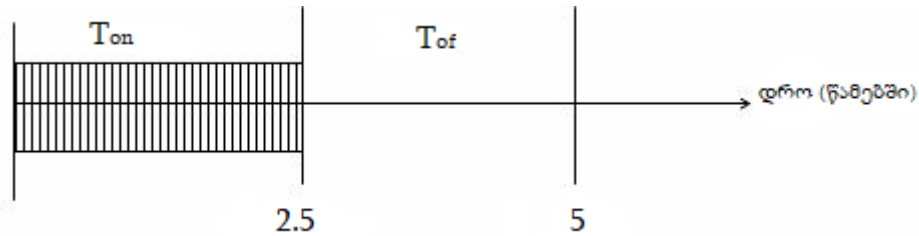
ნახ 12. დროითი ფრეიმის სტრუქტურა

რიცხვი რომელიც მიღებულია პასიური მდგომარეობის რეჟიმისთვის გამომდინარეობს პრაქტიკული შედეგების დაკვირვებებიდან გამომდინარე, რომელიც მერყეობს 1-დან 32 ბაიტის ფარგლებში [6]. დრო, განაწილებულია ინტერვალებში (0.416, 13.312) მწმ. იმ შემთხვევაში თუ კი კვანძი აღიქვამს გადასაცემი დიაპაზონის დაკავებულ მდგომარეობას მანამ სანამ პასიურ მდგომარეობაში გადავა, სხვა ტაიმერი დაიწყებს ათვლას სახელწოდებით „პასიურ მდგომარეობაში გადასვლის შემაკავებელი“. ტაიმერი ირჩევს შემთხვევით რიცხვს 1-დან 16 ბაიტის ფარგლებში, აქედან გამომდინარე დროის განაწილება ხდება ინტერვალებსი (0.416, 6.656) მწმ [6]. დროითი ფრეიმის ცხრილი რომელიც ნაჩვენებია ნახ. 12-ზე ერგება მხოლოდ სენსორულ კვანძს რომელიც გადაცემის მდგომარეობაშია.

3.5 სენსორულ ქსელებში გამოყენებული ქსელური დონის პროტოკოლი

კლასიკური GSP პროტოკოლი იყენებს ამ პროტოკოლის მხოლოდ საბაზოსო ვერსიას, რადგან რადიო მიმღები ჩართულია 2,5 წამის განმავლობაში, P=1 ალბათობით, და გათიშულია შემდეგი 2.5 წამის

განმავლობაში. როდესაც სენსორული კვანძი მიიღებს პაკეტს, ასევე ახდენს ამ პაკეტის გადაცემასაც. ასე რომ, ვხვდებით 50%-იან სამუშაო ციკლს, რომელსაც ასევე შეგვიძლია დავაკვირდეთ ნახ 13-ზე.



ნახ 13. მუშა ციკლის სქემა

3.6 სენსორულ ქსელში გამოყენებული პროგრამული (გამოყენებითი) დონის პროტოკოლი

მარტივი პროგრამული სქემის საშუალებით, თითოეულ კვანძს აქვს ერთი უკუქმედების მაკონტროლებელი ფრეიმი რომელსაც ქსელში ყოველ 80 მწმ-ის განმავლობაში აგზავნის. იმ შემთხვევაში თუ კი MAC დონის ქსელში გადაცემის ხარვეზი დაფიქსირდება, აპლიკაცია იწყებს უკუქმედების მაკონტროლებელი ფრეიმის გაგზავნას, ხოლო შემდეგ მაკონტროლებელს გააგზავნის მხოლოდ მაშინ თუ კი MAC დონიდან ინფორმაციის წარმატებით მიღების დასტურის სიგნალს მიიღებს. 52 მკწმ ესაჭიროება 1 ბიტი ინფორმაციის გადასაცემად 19.2 კბტ გადაცემის ნაკადის შემთხვევაში. მიკროკონტროლერს შეუძლია 8MIPS ბრძანების ერთდროული განხორციელება 8 მგჰც კრისტალის საშუალებით, იმ დროში რაც ესაჭიროება 1 ბიტის გადასაცემად, აქედან გამომდინარე კვანძს ჯამურად შეუძლია 416 ინსტრუქციის განხორციელება [9]. აპლიკაციისა და გადაცემის ალგორითმის პროგრამირება ხდება TinyOS და nesC პროგრამული კოდირების საშუალებით.

3.7.1 სენსორული ქსელის სასიცოცხლო დროის გაზომვის მიმდინარეობა

იმისათვის, რომ ქსელის სასიცოცხლო დროის პირდაპირი გაზომვითი სამუშაოები ჩაგვეტარებინა მოვახდინეთ ყველა სენსორული კვანძის მკვებავი ელემენტის სრული გადამუხტვა. ყველა სენსორული კვანძის

მკვებავი ელემენტის თავდაპირველი ძაბვის გაზომვა განხორციელდა. კვანძებმა ქსელში ინფორმაციის მიმოცვლა GSP მეთოდის გამოყენებით დაიწყეს. პაკეტებმა საბოლოოდ მიაღწიეს დანშნულების წერტილამდე, ცენტრალურ სადგურამდე, რომელიც უკავშირდება უწყვეტი კვების წყაროს მოდულს (MIB510), რომელიც იყენებს AC კვების წყაროს და სერიული პორტის საშუალებით პირდაპირი კავშირი აქვს კომპიუტერთან. ცენტრალური სადგური ყველა მიღებულ პაკეტს გზავნის კომპიუტერში რომელიც “plain text” ფაილის სახით ინახავს ამ ინფორმაციას. ფაილში ასევე მითითებულია მიღებული ინფორმაციის რიცხვი და დრო. ცენტრალური სადგურის სამუშაო პროტოკოლს არ წარმოადგენს GSP, ამიტომ მას შეუძლია პაკეტების მხოლოდ მიღება. მისი რადიო მიმღები ყოველთვის ჩართულ მდგომარეობაშია, პაკეტების მიღების პროცესის შემდეგ, ირთვება მთვლელის ოპერაცია, რაც მიღებულ პაკეტებს კომპიუტერის მიმართულებით გზავნის. ქსელი ამ მდგომარეობაში დარჩა მანამ, სანამ ცენტრალური სადგური მოწყობილობებიდან ყველა პაკეტს არ მიიღებს. პაკეტების მიღების შეჩერება კი ნიშნავს სენსორული კვანძების ფუნქციონირების შეჩერებას (ელემენტის სრულ დახარჯვას). შემდეგ ხდება ინფორმაციის სრული გაანალიზება მიღებული ფაილებიდან, რომ გავიგოთ თუ როდის მოხდა პრიველი და ბოლო პაკეტის მიღება თითოეული მოწყობილობიდან. დროების ამ სახით შეკვეციტ გასაგები გახდა თუ რა დროის პერიოდი იმუშავა კვანძმა (კვანძის სასიცოცხლო პერიოდი). *ხოლო, მომენტი როდესაც პირველმა კვანძმა შეწყვიტა ფუნქციონირება, განისაზღვრა ქსელის მუშა დროის სახელწოდებით.*

3.7.2 სენსორული კვანძის ძაბვის საშუალო მნიშვნელობა

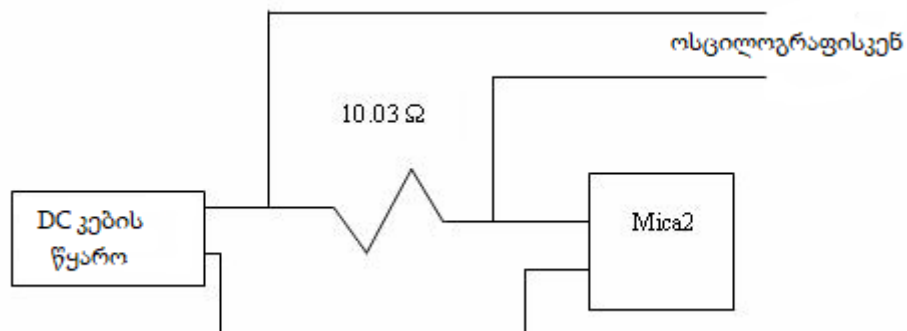
ყოველი ახალი ექსპერიმენტის დაწყებამდე იზომებოდა თითოეული კვანძის თითოეული ელემენტის საშუალო DC ძაბვის მნიშვნელობა. გამორთული კვანძის შემთხვევაში ძაბვის მნიშვნელობა მუდმივ სიდიდეს წარმოადგენდა. როდესაც კვანძს ძაბვა მიეწოდა, მიწოდებულმა ძაბვის მნიშვნელობამ ცვლილება დაიწყო. ყოველი მცდელობის დასასრულს,

თითოეული კვანძის ძაბვის მნიშვნელობა ისევ გაზომილ იქნა. ძაბვის მნიშვნელობის ვარდნა მოხდა როდესაც მიმღებ-გადამცემის გააქტიურება მოხდა და პირიქით მისი მომატება მოხდა მიმღებ-გადამცემის გამორთვა განხორციელდა. თუმცა მიღებული მნიშვნელობები არ წარმოადგენდნენ მუდმივ სიდიდეებს, რომლებიც სატესტო სცენარებში არ გამოგვიყენებია.

3.7.3 სენსორული კვანძების ძაბვისა და დენის მომენტალური მნიშვნელობები

ექსპერიმენტის ეს ნაწილი განხორციელდა ერთი სენსორული კვანძისა და ერთი ცენტრალური სადგურის გამოყენებით. მოპოვებული მნიშვნელობების გამოყენება მოხდა არაპირდაპირი მცდელობით გაზომილიყო ენერჯის მოხმარება ერთი კვანძის შემთხვევაში. ერთი კვანძის დაკავშირება მოხდა 10.03Ω რეზისტორთან და DC კვების წყაროსთან. გაიზომა ძაბვის ვარდნის პროცესი რეზისტორზე. დენის გამოთვლა მოხდა გაზომილი სიდიდეების მნიშვნელობებით. დაბალი წინააღობის მნიშვნელობა იქნა შერჩეული იმისათვის, რომ შემცირებულიყო დამატებითი ძაბვის ვარდნები. მიღებული პარამეტრები ნაჩვენებია ნახ. 14.

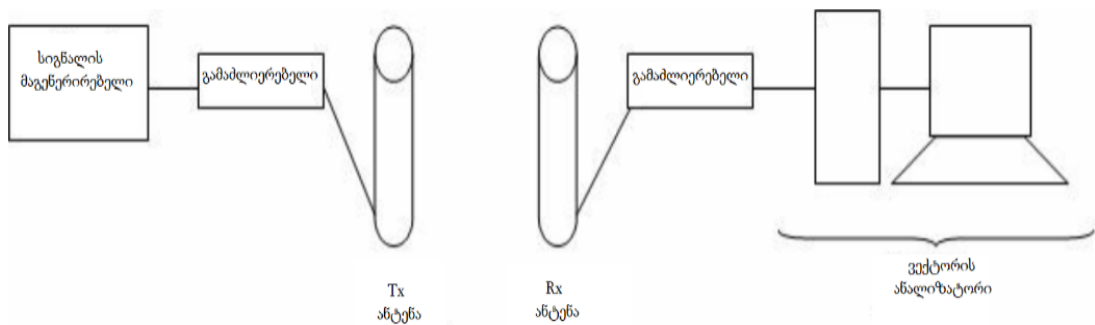
როდესაც კვანძი იღებდა სიგნალს, დენის გაზომვა განხორციელდა კვანძში მანამ სანამ სხვა კვანძი მუშაობდა GSP მეთოდით და ახდენდა ინფორმაციის მიმოცვლის პროცესს. ამავე დროს მეორე კვანძმა განახორციელა გადაცემის პროცესი, ხოლო თავდაპირველმა მოახდინა ფრეიმების მიღება და გადაცემა.



ნახ 14. კავშირის სქემა ძაბვის გაზომვისთვის

3.7.4 სენსორული კვანძის ანტენის კალიბრაცია

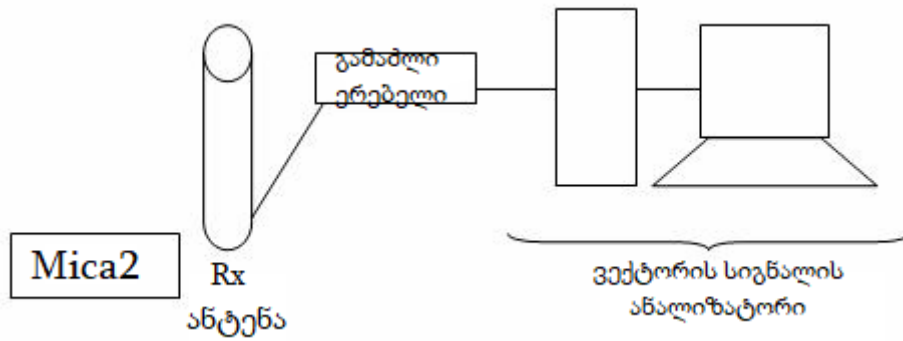
კვანძებში გადაცემის სიმძლავრის გასაზომად გამოყენებულია Maxrad MFB8133 ტიპის ანტენებით გასხივებული სიმძლავრის გაზომვა. გამოყენებული არალიცენზირებული ტალღის დიაპაზონი მოქცეულია შემდეგ დიაპაზონში 806-დან 866მგჰც-მდე [11], ანტენების ქარხნულ პარამეტრს წარმოადგენს 813მგჰც. გამომდინარე იქიდან, რომ უმცირესი სიხშირის მნიშვნელობა რომელიც კვანძებს შეუძლიათ გამოიყენონ არის 903 მგჰც, სიმძლავრის გადაცემის ფაქტორს ესაჭიროება კორექტირების ფაქტორიც. ნახაზი 15 ახდენს ანტენების კალიბრაციის ილუსტრირებას. სიხშირის დამუშავება გაკეთებულ იქნა სიგნალის გენერატორით, რომ შეგვეფასებინა ანტენისა და გამოყენებული კაბელის უკუ ეფექტი კვანძის სიხშირული დიაპაზონის არეალში.



ნახ 15. ანტენის კალიბრაციის აპარატურა

3.7.5 სენსორული ქსელის გადაცემული და მიღებული სიმძლავრის მნიშვნელობები

ვექტორული სიგნალის ანალიზატორი იქნა გამოყენებული გამოსასვლელი სიგნალის სიმძლავრის მონიტორინგის განსახორციელებლად, ამ შემთხვევაში მიმღები ანტენა კვანძთან ახლოს იყო ლოკალიზებული. ნახ. 17 გვიჩვენებს ამ განლაგებას.



ნახ. 16. აპარატურის განლაგება გადაცემული სიმძლავრის გასაზომად

ანალოგიური მეთოდი იქნა გამოყენებული მიღებული სიგნალის სიმძლავრის გასაანალიზებლად, მაგრამ ამ შემთხვევაში მიმღები ანტენა განთავსებული იქნა ცენტრალურ მაკონტროლებელ კვანძთან. ვექტორული სიგნალის ანალიზატორი (Vector Signal Analyzer) გვიჩვენებს პროგრამული უზრუნველყოფის საშუალებით ანტენის მიერ მიღებული ტალღის ფორმის მნიშვნელობას დროისა და სიხშირულ სიბრტყეებში.

3.7.6 სენსორულ ქსელში ფრეიმების გადაცემა-მიღების პროცესი

3.7.5-ში გამოყენებული პარამეტრების ანალოგიურად ვექტორული სიგნალის ანალიზატორის დემოდულაციის ფუნქცია იქნა გამოყენებული ფრეიმის სტრუქტურისა და მისი შემადგენლობის შესასწავლად. გადაცემული პაკეტი გადიოდა დეკოდირების პროცესს დეკოდერში, რომლის მიმღების ანტენაც ახლოს მდებარეობდა გადამცემ კვანძთან. ფრეიმის შემადგენლობის შესწავლის დასრულების შემდეგ, ინფორმაცია განთავსდა კომპიუტერის მიერ გენერირებულ ფაილში და დაადასურა, რომ ფრეიმის გადაცემა-მიღების პროცესი წარმატებულად განხორციელდა.

თავი 3_ის შედეგები

წარმოჩენილია ექსპერიმენტის მსვლელობის პროცესი, რომლის მიზანს წარმოადგენს ქსელის ქასიცოცხლო პერიოდის გაზომვა, და ასევე იმის გაანსაზღვრა თუ რა დრო დასჭირდება პირველი კვანძის მწყობრიდან საბოლოოდ გამოსვლას.

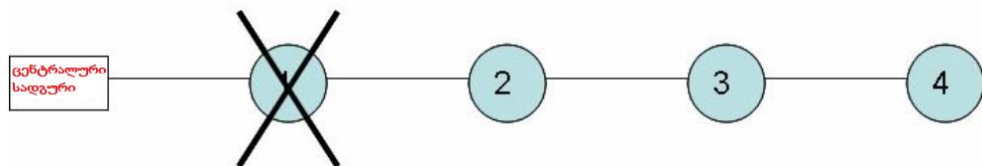
შემუშავებულია ექსპერიმენტული ქსელი და სამუშაო არეალი რომელიც შედგება ექვსი სენსორული კვანძისა და ერთი მმართველი ცენტრალური კვანძისაგან.

თავი 4. ექსპერიმენტულად მიღებული შედეგები და მათი ანალიზი

ამ თავში განვიხილავთ სენსორული ქსელის მუშაობის დროის გაზომვის რამოდენიმე მეთოდს. ამისათვის ჩატარებულ იქნა რამოდენიმე ტესტი, რათა სათანადო მოდელის შედგენა გამხდარიყო შესაძლებელი. მოცემულია თითოეულ კვანძში მოხმარებული ენერჯის რაოდენობა, რომელიც გამოყენებულია მთლიანობაში ქსელის სასიცოცხლო დროის გამოსაანგარიშებლად. საბოლოოდ, კვანძში ენერჯის გამოთვლის მეთოდს განვიხილავთ GSP და CSMA მოდელების მიხედვით.

4.1 სენსორული ქსელის სასიცოცხლო დროის განსაზღვრის პირველი მეთოდის განხილვა

მე-2 თავში განვიხილეთ ქსელის მუშაობის დროის გამოთვლის მაგალითი როდესაც ყველა კვანძი გააქტიურებულ, მუშა მდგომარეობაში იმყოფებოდა და ექსპერიმენტი დასრულდა როდესაც პირველმა კვანძმა შეწყვიტა ფუნქციონირება. მიუხედავად იმისა რომ განსხვავებული მეთოდებიც არსებობს, ეს მეთოდი გამოხატავს კვანძის მუშაობის ყველაზე ნეგატიურ სცენარს (რაც ექსპერიმენტის მსვლელობისთვის გვესაჭიროებოდა). ნახაზი 17 ილუსტრირებას აკეთებს სცენარისა, როდესაც ერთი კვანძის ფუნქციონირების შეწყვეტის შემდეგ მთელი ქსელი უფუნქციო ხდება მიუხედავად იმისა, რომ დანარჩენი კვანძები გამართულად მუშაობენ.



ნახ 17. ქსელის მუშაობა, განსაზღვრული პირველი კვანძის მიერ

წინა თავებში განხილულ ექსპერიმენტში, კვანძი #11 ყოველთვის ადრეულ სტადიაზე წყვეტდა ფუნქციონირებას - ექსპერიმენტის დაწყების მომენტიდან დაახლოებით 1 წუთიანი პერიოდის განმავლობაში. ამ

ექსპერიმენტის პრობლემა იდენტიფიცირებულ იქნა როგორც აპარატურული გაუმართაობა, და მისი გასწორება შესაძლებელი გახდა კვანძი #20-ის ჩანაცვლებით. პირველი სერიის ექსპერიმენტებიდან მიღებული შედეგები არ ყოფილა თანმიმდევრული და ლოგიკური, რადგან ან პირველი კვანძი წყვეტდა ფუნქციონირებას მუშაობის ადრეულ სტადიაზე, ან კვანძების გარკვეული თანმიმდევრობა წყვეტდა ფუნქციონირებას მიუხედავად იმისა, რომ ძაბვის სარეზერვო მარაგი ჯერ კიდევ ჰქონდათ. მეორე სერიის ტესტირების ექსპერიმენტებში, კვანძის ფუნქციონირების შეწყვეტის შემდეგ ირთვებოდა ძირეული გადატვირთვის ბრძანება (hard reboot) და კვანძი აგრძელებდა ფუნქციონირებას. 10_დან 8 შემთხვევაში კვანძმა განაახლა ნორმალური მუშაობა, რაც მიუთითებს იმაზე, რომ კვების სარეზერვო მარაგები კვანძს ჯერ კიდევ აქვს. ამის შედეგად კვანძის ფუნქციონირების განსაზღვრის ცნება ახლიდან ჩამოყალიბდა, რომლის მიხედვითაც, კვანძი ითვლება უფუნქციოდ, როდესაც გადატვირთვის ბრძანების 3-ჯერ 10 წუთიანი ინტერვალებით გამეორების შემდეგ კვანძი ვერ აახლებს ნორმალურ მუშაობას. იმ შემთხვევაში თუ კი ბოლო გადატვირთვიდან 30 წუთიანი პერიოდის შემდეგ კვანძისგან ვერ მოხერხდება კავშირის მიღება იგი ჩაითვლება უფუნქციოდ.

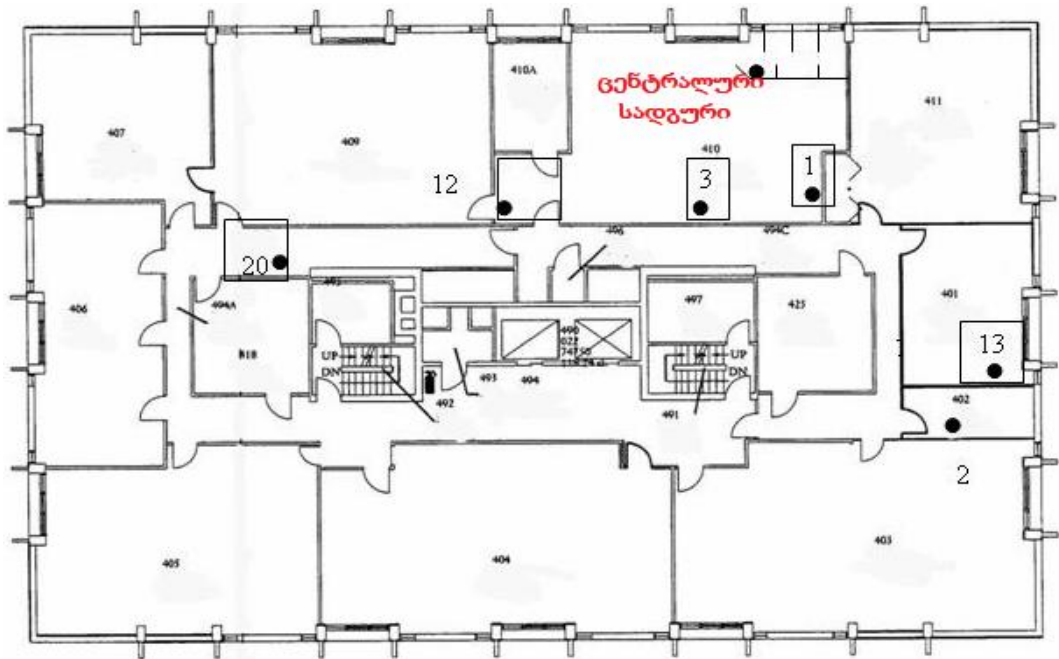
ინტუიციურად გასაგებია, რომ კვანძის სამუშაო დრო დამოკიდებულია მასში ინტეგრირებულ ელემენტზე [27, 30]. თუმცა განუსაზღვრელ განმარტებად რჩება კვანძის მდგომარეობის ცნება, როდესაც მას დაევალება მიღება-გადაცემის შეწყვეტა სამუდამოდ. ამიტომ, ამ ტიპის კვანძები აუცილებლად მოითხოვს გარკვეული განსაზღვრების მინჭებას, რადგან მიუხედავად იმისა, რომ ისინი მიღება-გადაცემას არ ახდენენ, პოტენციურად შესაძლოა დაიწყონ ეს პროცესი. ცხრ. 7 მე-2 სერიის ექსპერიმენტების შეჯამებას ასახავს. ნახ. 18 გვიჩვენებს პირველი (მთავარი) კვანძის ფუნქციონირების შეწყვეტას. ფუნქციონირების შეწყვეტა კი ყველაზე ხშირად შეეხო #13 კვანძს. თუმცა ამ ნახაზის მიხედვით არ არსებობს რეალური

ურთიერთდამოკიდებულება კვანძის ფუნქციონირების შეწყვეტასა და მის ადგილმდებარეობას შორის.

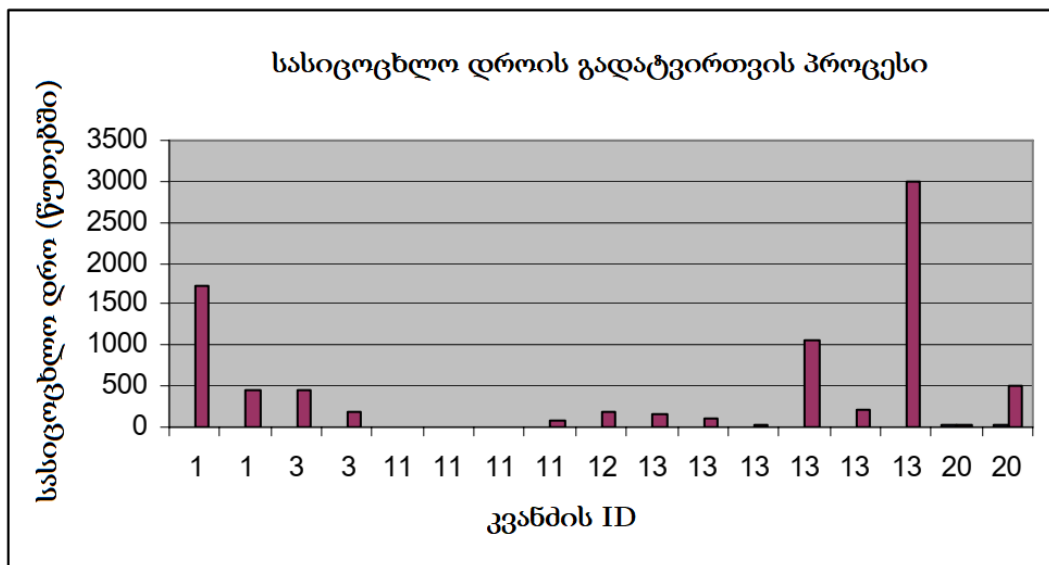
ნახ. 19 გვიჩვენებს ქსელში კანძების სასიცოცხლო რესურსების გადანაწილებას, როდესაც 1_ლი კვანძი შეწყვეტს ფუნქციონირებას. ამ შემთხვევაში უგულებელყოფილია რესურსები რომლებიც 5 წუთს არ აღემატება, საშუალო ნიშნული შეადგენს 580,54 წუთს $\pm 366,76$ (C.I. 90%).

ცხრილი 7. ქსელის საშუალო დროში მონაწილე კვანძების გადატვირთვის მაჩვენებლები

#	1_ლი უფუნქციო კვანძი	სიცოცხლის დრო (წუთებში)	V _{პირველი} (ვოლტებში)	V _{ბოლო} (ვოლტებში)
1	11	1.75	2.712	2.502
2	11	1.9	2.724	2.563
4	11	1.25	2.782	2.537
5	13	153.00	2.605	2.505
7	11	85.15	2.682	2.557
8	13	95.70	2.727	2.489
9	3	458.97	2.602	1.272
10	13	37.82	n/a	2.467
11	3	183.45	2.74	1.82
12	12	192.57	2.616	1.813
13	13	1051.00	2.727	2.547
14	13	205.02	2.734	2.619
15	20	19.12	2.605	1.25
16	1	1717.77	2.756	2.547
17	13	2983.17	2.828	2.441
18	20	492.00	2.789	2.633
19	1	452.83	2.75	2.496



ნახ 18. 1_ლი კვანძის ფუნქციონირების შეწყვეტის ადგილმდებარეობა



ნახ 19. სენსორული კვანძების სასიცოცხლო დროის გადატვირთვის პროცესი

4.2 სენსორული ქსელის მუშაობის დროის განსაზღვრის მეორე მეთოდის განხილვა

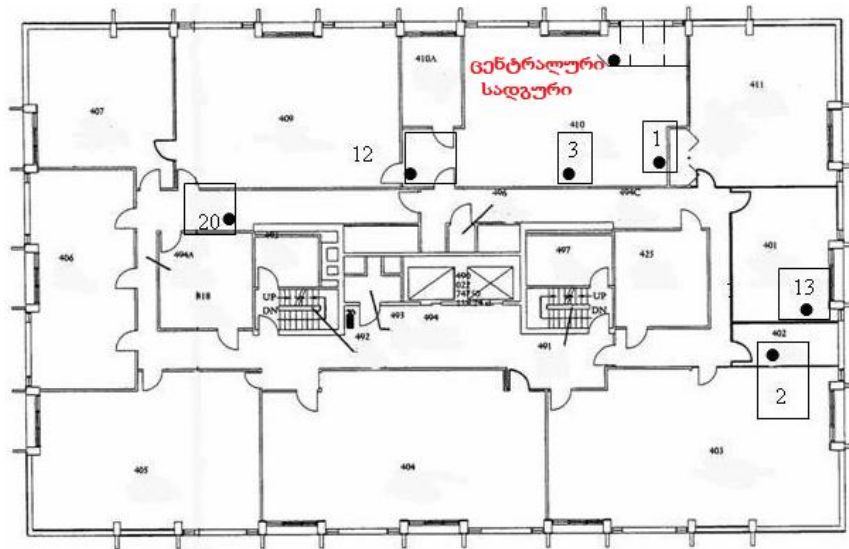
მეორე მეთოდის შემთხვევაში ასევე განიხილა ქსელის სასიცოცხლო პერიოდის ვარიანტი როდესაც სენსორული კვანძიდან ინფორმაციული ერთეული ვერ აღწევს ცენტრალურ დამამუშავებელ სადგურამდე, პროცესი ხორციელდება კვანძის პროგრამული მხარის გადატვირთვის გარეშე. მეორე

სერიის ექსპერიმენტების ინფორმაცია ხელახლა იქნა გაანალიზებული, ცხრ. 8 გვიჩვენებს ამის შედეგებს. ნახ. 20 ნაჩვენებია პირველ ადგილზე მყოფი კვანძები, რომელთაც დროზე ადრე შეწყვიტეს ფუნქციონირება. ამ ანალიზში თითოეულმა კვანძმა ერთხელ მაინც შეწყვიტა ფუნქციონირება, თუმცა ყველაზე ხშირად რომელი კვანძიც წყვეტდა ფუნქციონირებას იყო #13.

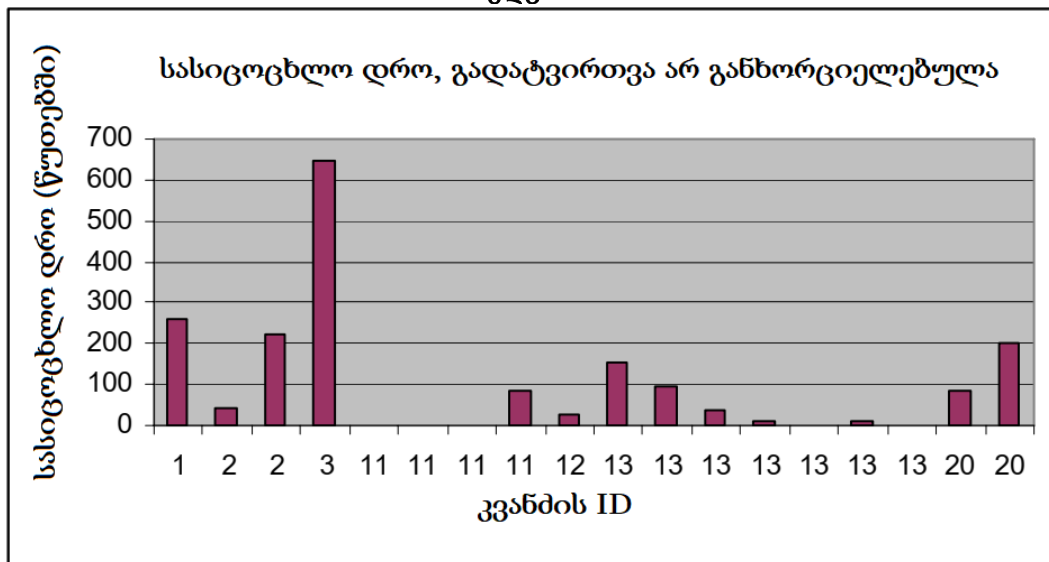
ნახ. 21 გვიჩვენებს პირველი კვანძის ფუნქციონირების შეწყვეტის შემდეგ ენერგო რესურსების გადანაწილებას. წინა მეთოდის მსგავსად ამოღებულია ყველა ის შედეგი, რომელიც ნაკლებია 5 წუთზე, საშუალო სამუშაო დრო შეადგენს 154,32 წუთს $\pm 83,29$ (C. I. 90%). ეს შედეგები ისევე როგორც წინა შედეგები, მიუღებელია.

ცხრილი 8. სამუშაო დრო გადატვირთვის გარეშე

კვანძი #	პირველი უფუნქციო კვანძი	სასიცოცხლო დრო (წუთებში)	V _{პირველი} (ვოლტებში)	V _{ბოლო} (ვოლტებში)
1	11	1.75	2.712	2.502
2	11	1.90	2.724	2.563
4	11	1.25	2.782	2.537
5	13	153.00	2.605	2.505
7	11	85.15	2.682	2.557
8	13	95.70	2.727	2.489
9	2	45.00	2.602	n/a
10	13	37.82	2.687	2.467
11	13	12.78	2.672	n/a
12	20	86.75	2.67	n/a
13	3	646.37	2.652	2.564
14	20	201.02	2.773	2.611
15	13	1.57	2.694	2.415
16	1	257.47	2.756	2.547
17	12	28.63	2.698	2.404
18	2	220.55	2.801	2.646
19	13	1.80	2.738	2.718



ნახ 20. პირველი კვანძის ფუნქციონირების შეწყვეტის ლოკაცია, მეორე მეთოდის მიხედვით



ნახ 21. ქსელის სასიცოცხლო დრო, გადატვირთვის პროცესის განუხორციელებლად

ერთი მიშენელოვანი ფაქტორი რომელიც არ გაგვითვალისწინებია 1 და 2 სერიის ექსპერიმენტებში არის, ძაბვის მკვეთრი ვარდნის ფენომენი, რასაც მკვეთრი გავლენა შეუძლია მოახდინოს ჩვენს ექსპერიმენტზე, რადგან ფენომენი გულისხმობს კვანძის მკვებავი ელემენტის ძაბვის მკვეთრ ვარდნას, რაც გამოწვეულია ელემენტების არასრული განმუხტვით, როდესაც მათი დამუხტვის პროცესი განახლდა. ამ სახის ხარვეზის თავიდან ასაცილებლად შემდეგ ექსპერიმენტში აუცილებლად ხდებოდა ელემენტების სრული განმუხტვა მანამ სანამ მათი დამუხტვა

განახლდებოდა. ერთ-ერთ ექსპერიმენტში, ელემენტის ფაქტორი რომ გამოგვერიცხა, კვანძი დაკავშირებულ იქნა MIB510 უწყვეტ კვების წყაროსთან, თუმცა რამოდენიმე საათის შემდეგ კვანძმა ფუნქციონირება მაინც შეწყვიტა.

4.3 ალტერნატიული კვლევები

კვანძისა და ქსელის სასიცოცხლო დროზე რამოდენიმე ფაქტორი ახდენს გავლენას. ამიტომაც მე_4 სერიის ექსპერიმენტში სხვა კვანძების ინტერფერენციისაგან თავის აცილების მიზნით ექსპერიმენტი შედგა მხოლოდ ერთი კვანძის შემთხვევისათვის, რომელიც ემსახურება ქსელის სამუშაო დროის განსაზღვრის ლიმიტების დეტერმინაციას.

4.3.1 მიღებული სიგნალი

პირველი ალტერნატიული ექსპერიმენტით შევეცადეთ განგვესაზღვრა სიგნალის პარამეტრები, რომლის მიხედვითაც დავადგინეთ მიღებული და ჩავარდნილი პაკეტების რაოდენობა. ამავე დროს ამ ექსპერიმენტში გაიზომა ცენტრალური გამომთვლელი სადგურის მიღებაზე დახარჯული სიმძლავრის მნიშვნელობები, როდესაც პაკეტის მიღება წარმატებით / წარუმატებლად განხორციელდა. 3.7.4_ში აღწერილი პრცედურის გამოყენებით, ორი ანტენა იქნა გამოყენებული იმისათვის, რომ დაგვედგინა ანტენაზე მოსული სისტემის დანაკარგები. დამატებითი დანაკარგების გამოთვლა განვახორციელეთ შემდეგი სცენარის მიხედვით:

$$P_{tx} = -5\text{dBm}$$

$$P_{rx(\text{საშუალო})} = -38.852\text{ dBm}$$

$$\text{დანაკარგები} = P_{tx} - P_{rx(\text{საშუალო})}$$

$$\text{დანაკარგები} = -5\text{dBm} - (-38.852\text{dBm})$$

$$\text{დანაკარგები} = 33,852\text{dBm}$$

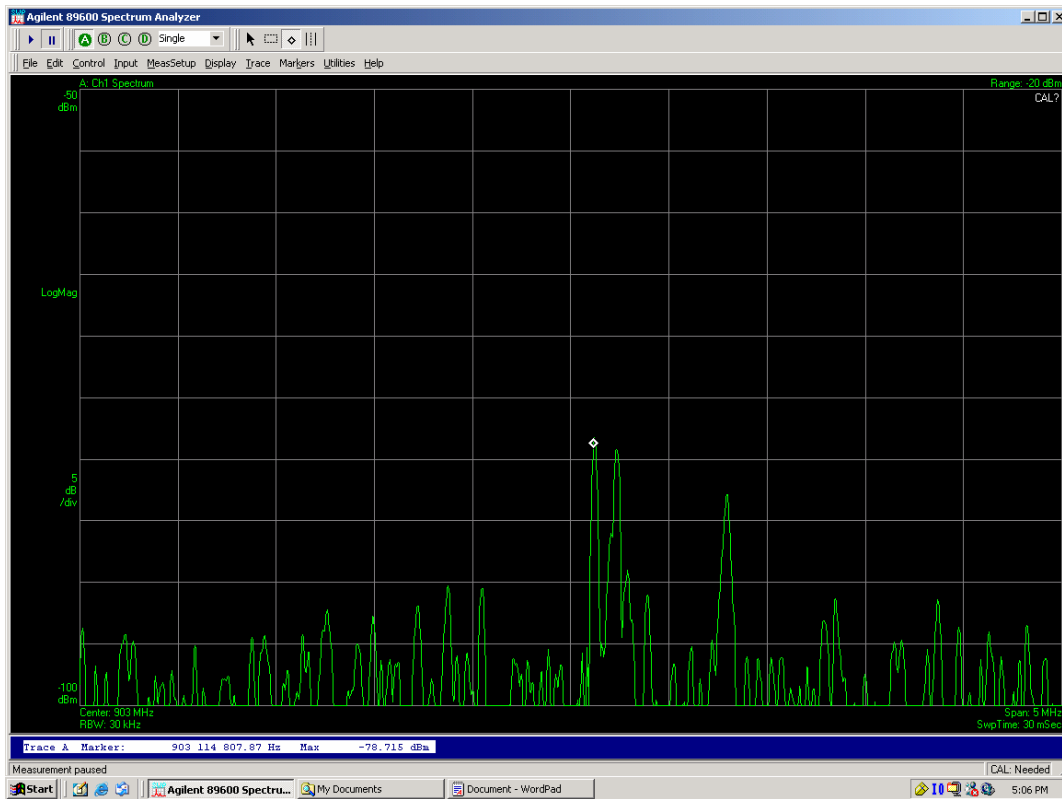
დაახლოებით ვვარაუდობთ დანაკარგებს ანტენაზე და კაბელზე:

$$L_{Ant} = \text{დანაკარგები}/2$$

$$L_{Ant} = 16.93\text{dBm}$$

აქედან გამომდინარე სიგნალის ეფექტურობის მნიშვნელობა არის 16,93dBm_ზე მაღალი.

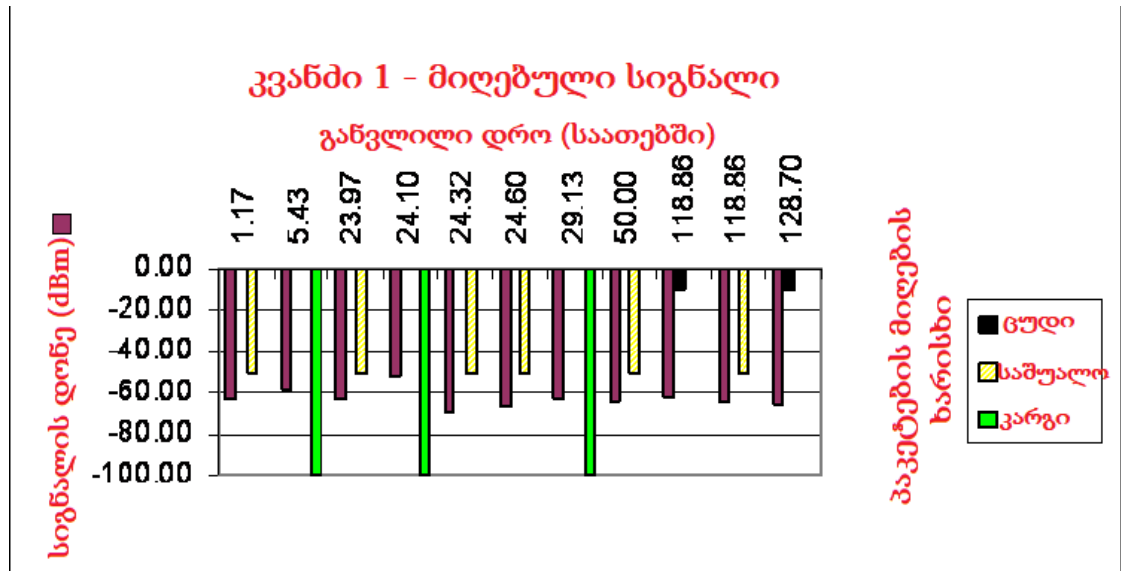
სიგნალის დონეები გაიზომა სპექტრის ანალიზაროტით. ნახ. 22 გვიჩვენებს სიგნალის მიღების ერთ ვარიანტს. მიუხედავად იმისა, რომ სიგნალის დონის გამოთვლილი მნიშვნელობაა (რომელიც ქვემოთ იქნება ნაჩვენები) -78,715dBm, L_{Ant} ანტენაზე რეალური მიღებული სიგნალი კი იყო - 61,79dBm.



ნახ 22. მიმღებზე მოსული სიგნალის დონე, კვანძი #1

სიგნალის სიმძლავრის ჩანიშვნა მიმდინარეობდა მთელი ექსპერიმენტის მსვლელობის დროს, ნახ. 23 გვიჩვენებს სიგნალის დონის ჯამურ მნიშვნელობებს, როდესაც ცენტრალური სადგური ახდენდა სიგნალის მიღებას და როდესაც ამის გაკეთება შეუძლებელი იყო. პაკეტების მიღების მნიშვნელობაა — 100, როდესაც მათი სრულყოფილი მიღება ფიქსირდება, იგივე მნიშვნელობა — 50 შეადგენს, როდესაც მისი პაკეტების მიღება არასრულად ხდება. და საბოლოოდ — 10, ამ დროს ცენტრალური სადგური საერთოდ ვრავერს ვერ იღებს. სიგნალის სიმძლავრის დონე მოცემულია

გრაფიკზე (ნახ. 22), სადაც სიგნალის მიღების მაღალი სიმძლავრის მნიშვნელობები ფიქსირდება, რომელიც $-63,47\text{dBm}$ და ზემოთ ფარგლებშია. თუმცა ასევე გვხვდება სიგნალის სიმძლავრის დონე $-62,474\text{dBm}$ როდესაც ცენტრალური სადგური სიგნალს საერთოდ არ იღებს. ერთი და იგივე კვანძთან მუშაობის დროს დადგინდა, რომ ზღვარი სიგნალის მიღებასა და მიუღებლობას შორის უმნიშვნელოა.

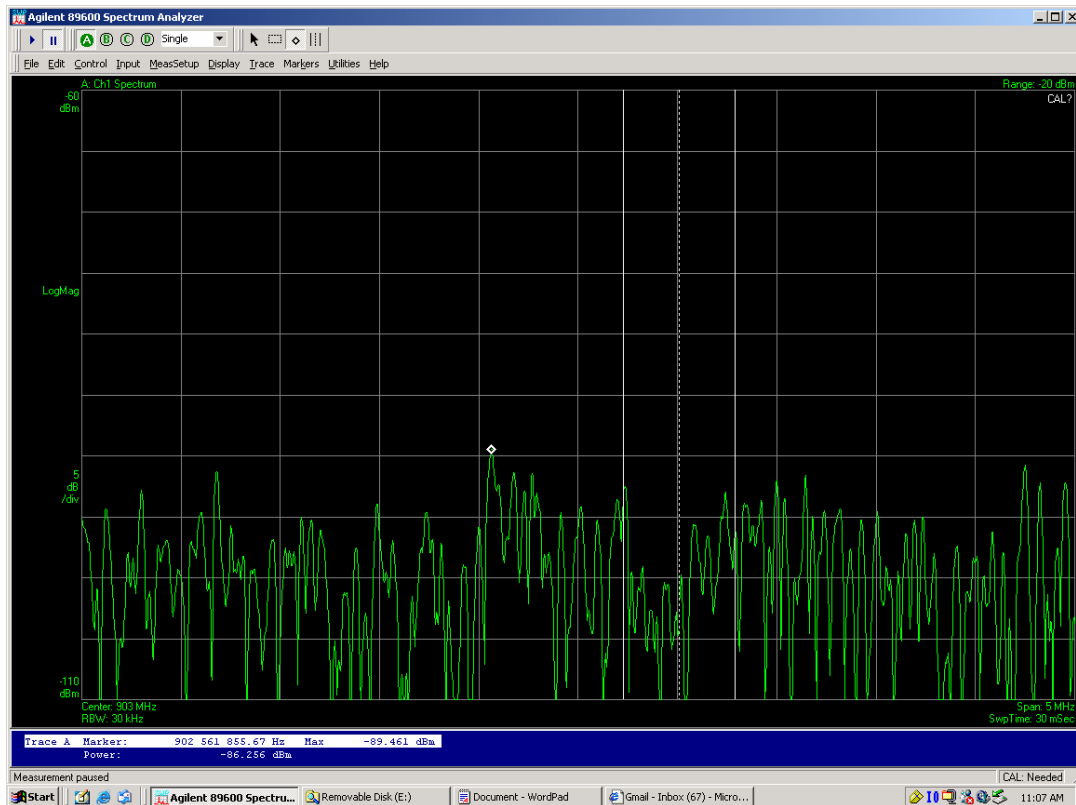


ნახ 23. ცენტრალურ სადგურზე მიღებული სიგნალის მნიშვნელობები 1_ლი კვანძის შემთხვევაში

მიღებული სიგნალის მნიშვნელობები საკმაოდ განსხვავდება მათი თეორიული მნიშვნელობებისაგან, (-98dBm) . საბოლოო ჯამში, შესაძლებელია ითქვას, რომ სიგნალის გადაცემის პროცესი არ ფერხდება სიგნალის ცვლილების გამო, თუმცა ამავე დროს საგულისხმოა, რომ გადამცემმაც შეწყვიტა ინფორმაციული ტრანსფერი. ამასთანავე, კვანძები რომლებიც მიიჩნევიან უფუნქციოებად შესაძლებელია მდებარეობდნენ ცენტრალურ სადგურთან ახლოს, ხოლო მათი მიმდინარე მდგომარეობა შესაძლებელია გამოეწვიოს დიდი რაოდენობით ინფორმაციის გატარებას. ექსპერიმენტის მსვლელობა გაგრძელდა რადგან სიგნალის ტესტირების პროცესმა ვერ შეძლო კვანძების პრობლემაზე საერთო სურათის შექმნა.

4.3.2 ხმაურის მნიშვნელობა

ხმაურის გაზომვა მოხდა 3.7.5 სექციის მიხედვით. ამოცანა მდგომარეობდა სიგნალზე დაკვირვების განხორციელებაზე როდესაც კვანძში გარკვეული პრობლემა აღმოცენდებოდა. ნახ. 24 გვიჩვენებს სიგნალზე ხმაურის მნიშვნელობის ერთ მაგალითს, პიკური მნიშვნელობით $-89,461\text{dBm}$ ($-72,53\text{ L}_{\text{Ant}}$), $902,561$ მგჰც სიშირეზე. სიგნალის მნიშვნელობა არ არის არც მუდმივი და არც პერიოდული. ასევე ხმაურის მნიშვნელობები გაიზომა ცენტრალურ სადგურთან ახლოს, რომლის შედეგებიც ნაჩვენებია ცხრ. 9. ასევე არ არის განსაზღვრული კორელაციური კავშირი ხმაურსა და კვანძის მდგომარეობას შორის (ფუნქციონირებადი ან უფუნქციო).



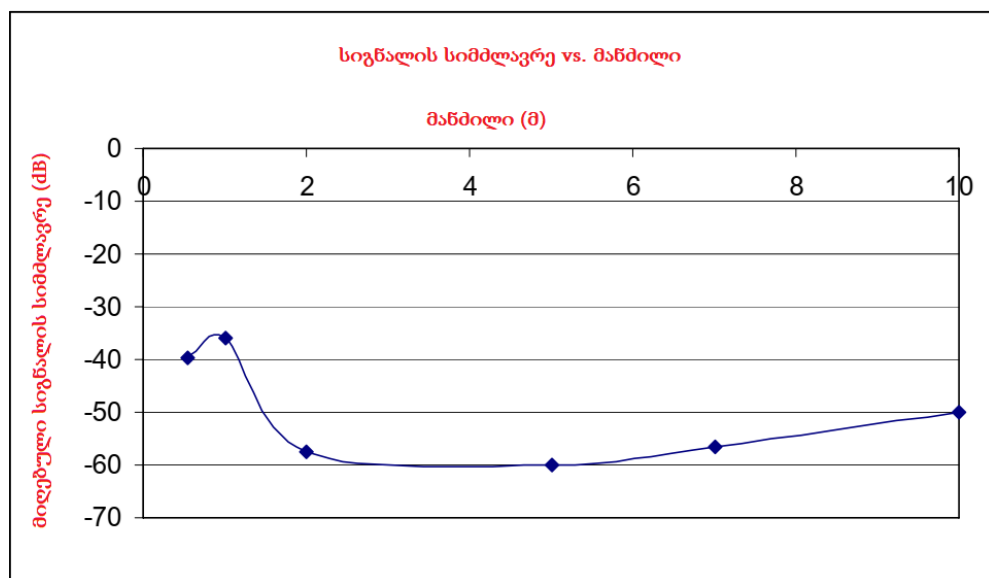
ნახ 24. ხმაურის მნიშვნელობა გადამცემ კვანძთან ახლოს

ცხრილი 9. გაზომილი ხმაურის მნიშვნელობები კვანძთან და ცენტრალურ სადგურთან ახლოს

	ხმაურის პიკური მნიშვნელობა, გადაცემაზე (dBm)	ხმაურის პიკური მნიშვნელობა, მიღებაზე (dBm)
საშუალო	-72.384	-69.534
CI 95%	0.973	0.916

4.3.3 სენსორული კვანძის სიგნალის სიმძლავრის განსაზღვრა დახურულ გარემოში

მიღებული სიგნალის სიმძლავრე დახასიათებულ იქნა როგორც კვანძთშორისი დაშორების მანძილის ფუნქცია. ნახ. 25 გვიჩვენებს მიღებული სიგნალის დონეს 5dBm გადაცემული სიმძლავრის შემთხვევაში. გაზომვები ჩატარდა ლაბორატორიულ პირობებში, 3.7.5 პროცედურის მიხედვით. მიღებული სიმძლავრის მნიშვნელობები მოცემულია უარყოფით dB ერთეულში. რაც უფრო უარყოფითი მიმართულებებისკენ მიისწრაფვის სიგნალი მით უფრო სუსტდება. მანძილის დანაკარგები შესაძლებელია იყოს არაუმეტეს 50dBm-ისა. რაც შესაძლებელია გამოწვეული ყოფილიყოს სატესტო არეალზე სიგნალის მრავალმხრივი გავრცელების გამო.

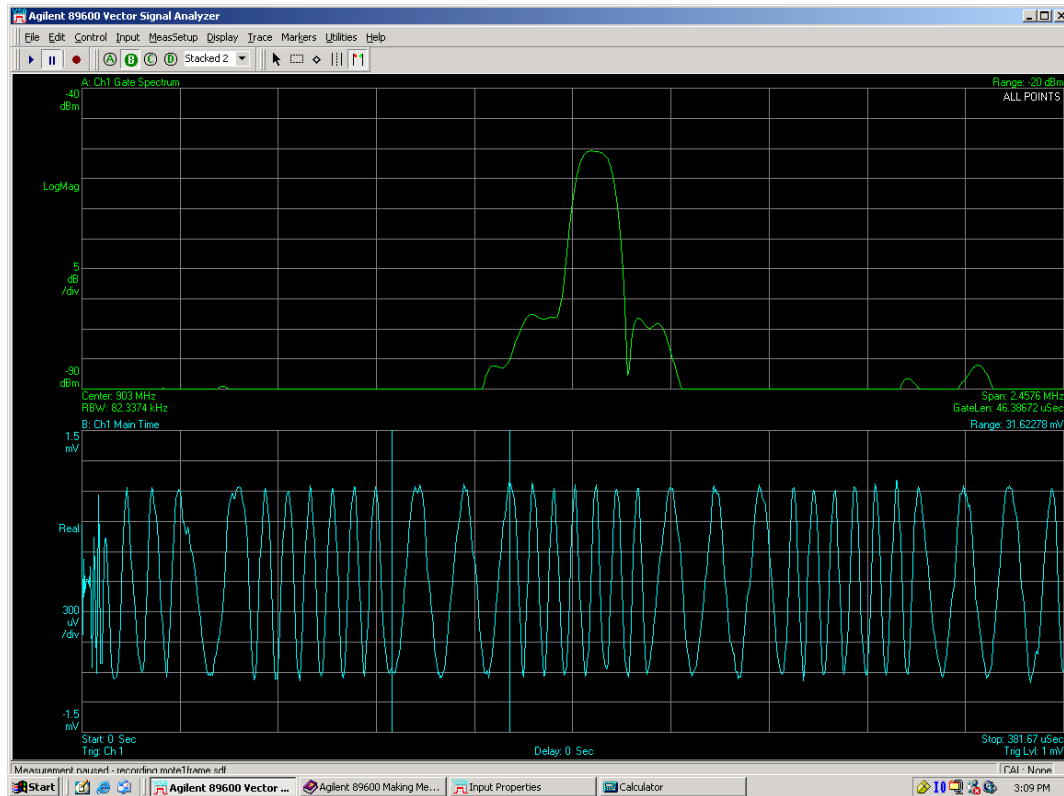


ნახ 25. მიღებული სიგნალის სიმძლავრის შედარება მანძილთან

4.3.4 მოდულირებული სიგნალის ანალიზი

რადგანაც სიმძლავრის დონე არ ხსნის თუ რატომ ხდებოდა პაკეტების ჩავარდნა, შემდეგი ექსპერიმენტით მოვახდენთ ამის გაანალიზებას, მოდულირებული სიგნალის საშუალებით, თუ რატომ ახდენს ცენტრალური სადგური რიგ შემთხვევებში პაკეტების მიღებას და რიგ შემთხვევაში მათ ჩავარდნას. ნახ. 26 გვიჩვენებს სიგნალის ტალღის ფორმის ილუსტრირებას როდესაც ცენტრალურ სადგურს შეეძლო ფრეიმის მიღება და კვანძი

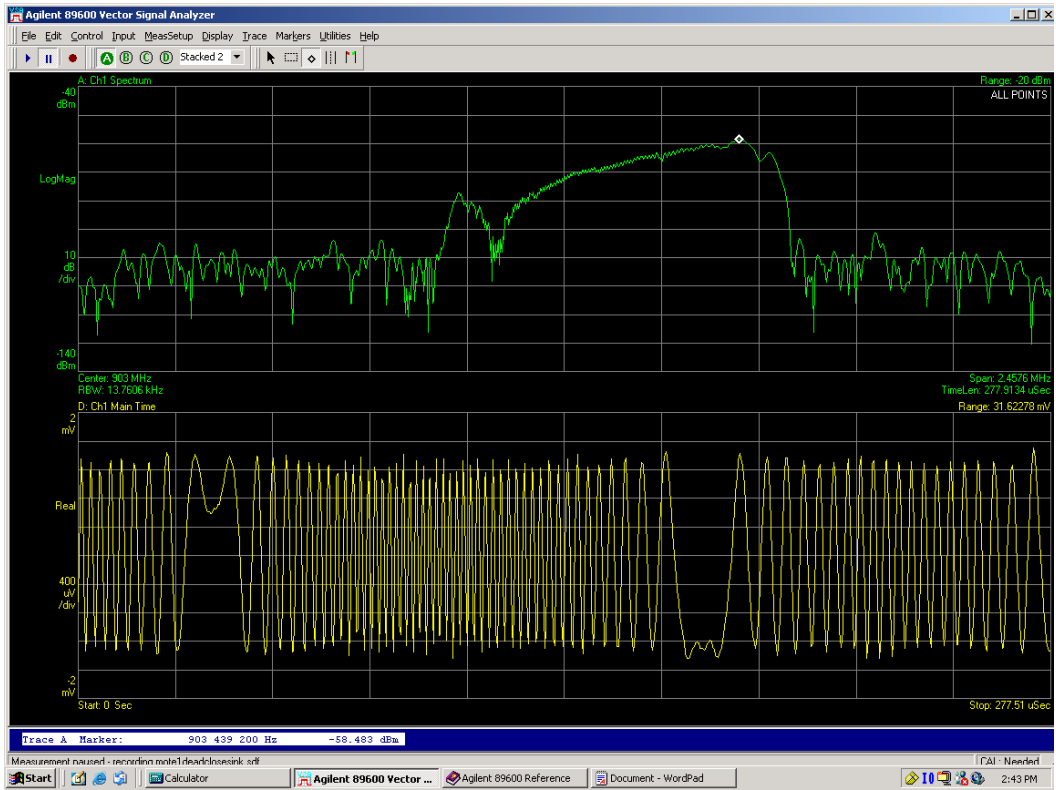
განთავსებული იყო სადგურთან ახლოს. ტალღის ფორმა FSK მოდულაციის ნათელი მაგალითია, სადაც გამოსახული გვაქვს ორი ტიპის სიხშირე. პირველი სიხშირეა 111,731კჰც, ხოლო მეორე 58,514კჰც. ამ სპეციფიურ ცდაში, პიკური სიმძლავრეა -50dBm_ის (-33,07dBm L_{Ant}) ფარგლებში.



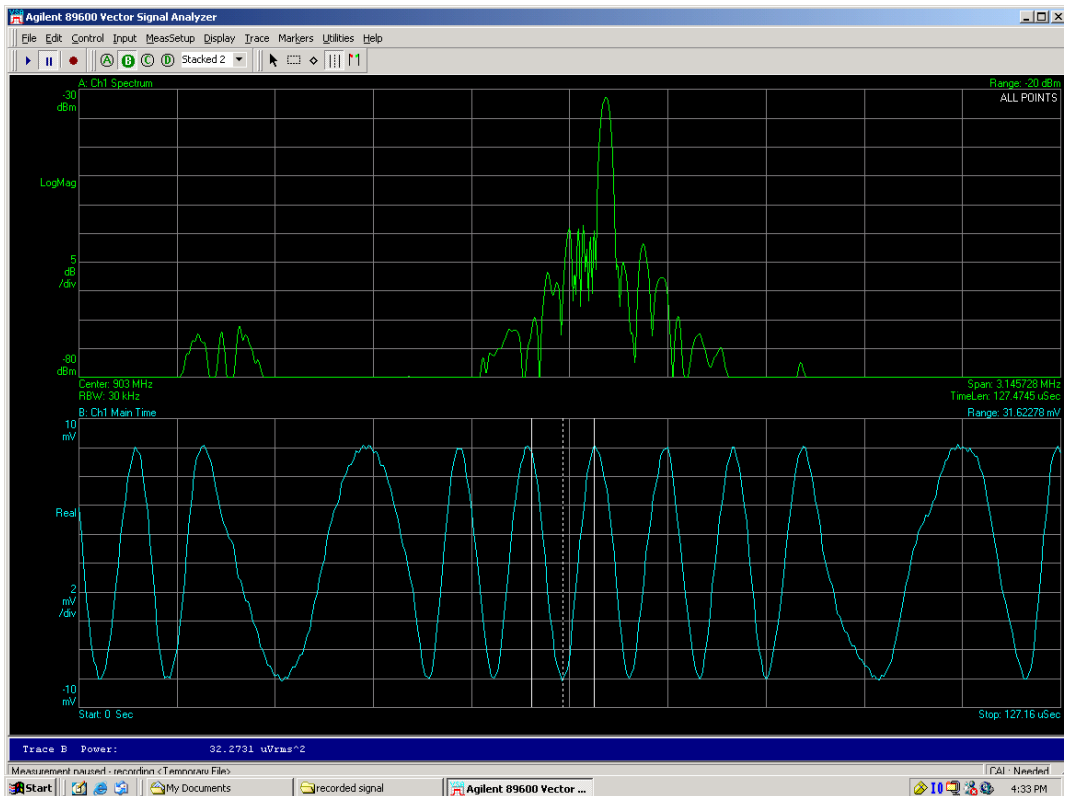
ნახ 26. მიღებული ფრეიმის გრაფი, როდესაც კვანძი ფუნქციონირებს

ნახ. 27 გვიჩვენებს ტალღის ფორმას დამუშავებულს სიგნალის ვექტორული ანალიზატორით, რომლის შემთხვევაშიც კვანძი სადგურთან ახლოს იყო განთავსებული. გადაცემული სიგნალი მიდის მიმღებზე - 41,56dBm (L_{Ant}) სიმძლავრით, რაც საკმარისია იმისათვის, რომ სიგნალი მიიღებოდეს წარმატებულად, თუმცა აღმოჩნდა, რომ მიღებული სიგნალი დაზიანებულია რის გამოც სადგურმა მისი დემოდულირება ვერ შეძლო.

კვანძები აგრძელებდნენ დამახინჯებული სიგნალის გადაცემას მანამ სანამ მათი ძირეული გადატვირთვა (hard reboot) არ განხორციელდა. ასეთი გადატვირთვის შემდეგ კვანძებმა სწორი FSK სიგნალის გადაცემა დაიწყეს, ხოლო სადგურმა შეძლო ნორმალური ხარისხის ფრეიმების მიღება. ნახ. 28 გვიჩვენებს მიღებულ სიგნალს კვანძების გადატვირთვის შემდეგ.



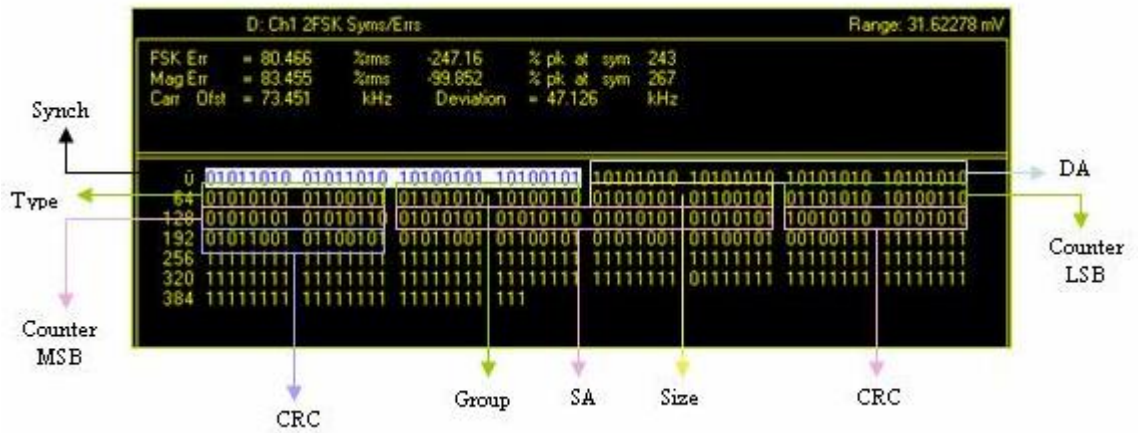
ნახ 27. 1_ლი კვანძიდან მიღებული სიგნალი, როდესაც პაკეტების მიღება ვერ განხორციელდა



ნახ 28. მიღებული სიგნალი, კვანძის გადატვირთვის შემდეგ

4.3.5 ფრეიმის ანალიზი

ჩვენი ექსპერიმენტის ფარგლებში გაანალიზდა ფრეიმის სტრუქტურა რათა დავრწმუნებულიყავით, რომ იგი თავსებადი იყო nesC პროგრამის ფუნქციონალთან. ნახ. 29 გვიჩვენებს ერთ-ერთი შედეგის მაგალითს მიღებულს ფუნქციის დემოდულირებით სიგნალის ვექტორული ანალიზატორისაგან.



ნახ 29. დეკოდირებული ფრეიმის სტრუქტურა

ფრეიმის სტრუქტურა მოცემულია მანჩესტერის ფორმატში, სადაც 0 მიესადაგება 01 მიმდევრობას, ხოლო 1 10 მიმდევრობას, [5]-ის მიხედვით. ფრეიმს შეგვიძლია შემდეგი სახე მივცეთ:

$$Synch = 01011010010110101010010110100101 = 0011001111001100 = 0x33CC$$

$$DA = 10101010101010101010101010101010 = 1111111111111111 = 0xFFFF$$

$$ტიპი = 01010101100101 = 00000100 = 0x04$$

$$ჯგუფი = 01101010100110 = 01111101 = 0x7D$$

$$ზომა = 01010101100101 = 00000100 = 0x04$$

$$გამომთვლელი LSB = 01101010100110 = 01111101 = 0x7D$$

$$გამომთვლელი MSB = 01010101010110 = 00000001 = 0x01$$

$$SA = 01010101010110 0101010101010101 = 0001 0000 = 0x01 \text{ (Little Endian)}$$

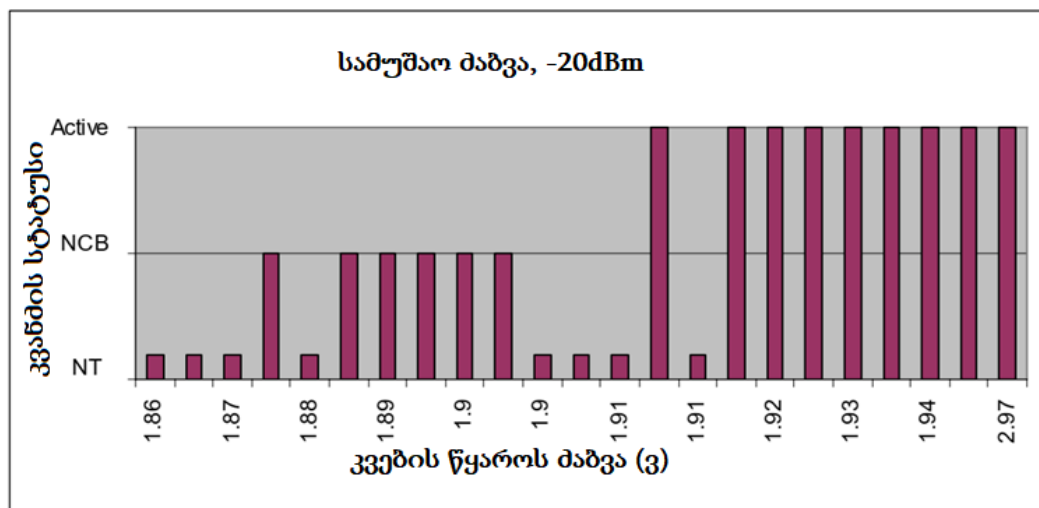
$$CRC = 10010110101010100101100101100101 = 1001111100100100 = 0x9F24$$

ექსპერიმენტის ფარგლებში ფრეიმის სტრუქტურის შედარება განხორციელდა, მიღებული ფრეიმების ფაილების ცხრილთან, შედარების

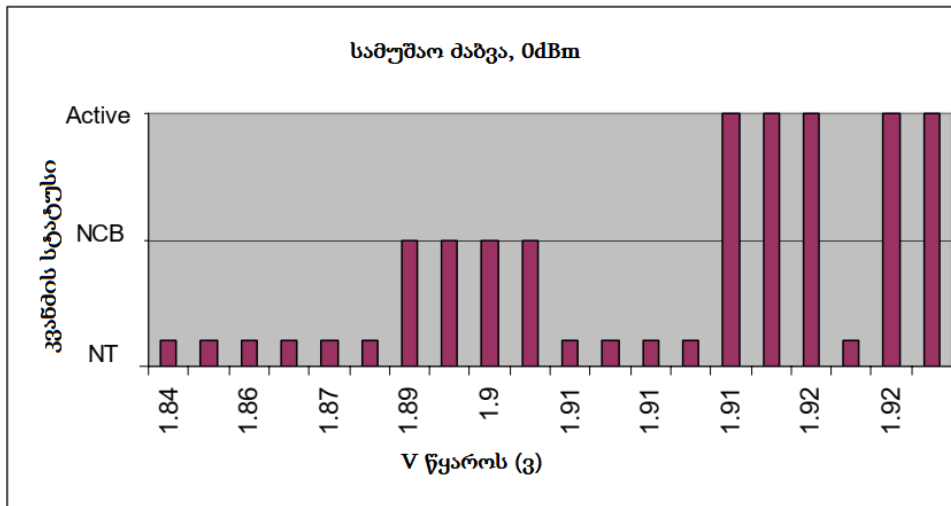
შემდეგ შესაძლებელი გახდა შესაბამისი ფრეიმის აღმოჩენა, აქედან დადგინდა, რომ ფრეიმის სტრუქტურა სწორია.

4.3.6 სენსორული კვანძისთვის განკუთვნილი ძაბვის მინიმალური საჭირო მნიშვნელობა

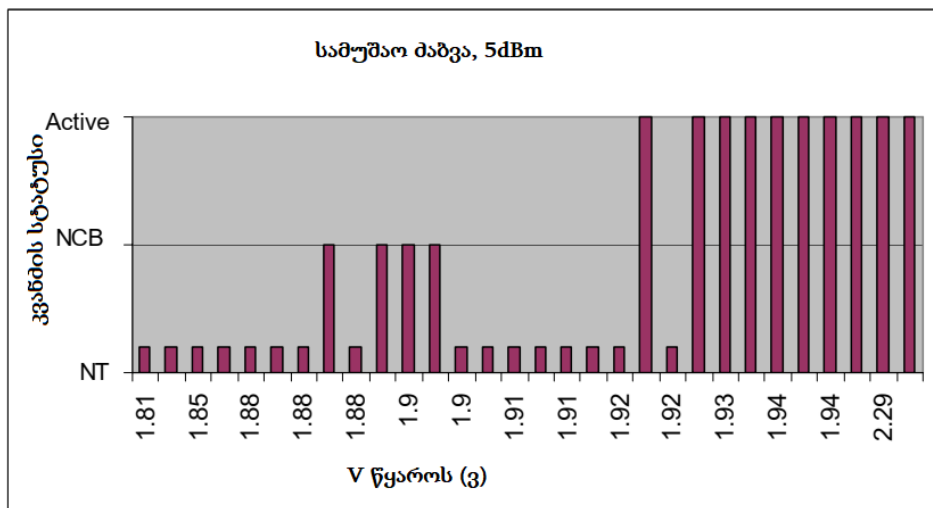
შემოწმდა ძაბვების მინიმალური საჭირო მნიშვნელობები. 3.7.3_ში გამოყენებული აპარატურის საშუალებით (რეზისტორის გარეშე), ხდებოდა კვანძში ძაბვის პირდაპირი ცვლილება, რომ განგვესაზღვრა თუ რა იქნებოდა ძაბვის მინიმალური სამუშაო მნიშვნელობა. ტესტი ჩატარდა მხოლოდ 1_ლი ნომრით აღნიშნული კვანძისთვის და გადაცემის სიმძლავრის დონის სამი მნიშვნელობა იქნა ექსპერიმენტირებული. ნახ 30, 31 და 32 ილუსტრირებენ ტესტის შედეგებს. კვანძის მდგომარეობებია: აქტიური, როდესაც კვანძი მუშაობს მასში ჩაშენებული პროგრამის ბრძანებების მიხედვით, NCB პროცესი, როდესაც კვანძი გადასცემს თუმცა მისი მუშაობა არ არის თანმიმდევრული და NT როდესაც კვანძი არ ახდენს გადაცემას და ითვლება როგორც უფუნქციო.



ნახ 30. მოხმარებული ძაბვის მინიმალური მნიშვნელობა, -20dBm



ნახ 31. მოხმარებული ძაბვის მინიმალური მნიშვნელობა, 0dBm



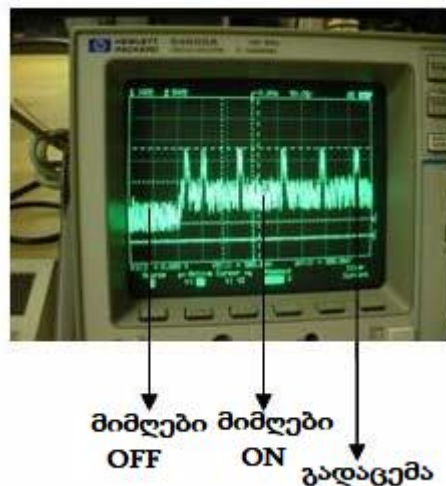
ნახ 32. მოხმარებული ძაბვის მინიმალური მნიშვნელობა, 5dBm

გადაცემული სიმძლავრის დონის ყველა შემთხვევაში, აქტიური ძაბვის მნიშვნელობა აღემატება 1,922ვ-ს; არა თანმიმდევრული პროცესის (როდესაც კვანძი არათანმიმდევრულ გადაცემას ახდენს) დროს, ძაბვის მნიშვნელობა იცვლება 1,898ვ-დან 1,871ვ-მდე, ხოლო გადაცემის არ არსებობის შემთხვევაში (NT) ძაბვის მნიშვნელობა ეცემა 1,871ვ-ზე დაბლა. აქედან დადგინდა, რომ გადაცემის სიმძლავრე არ არის დამოკიდებული მიწოდებული ძაბვის მნიშვნელობაზე, მანამ სანამ კვანძს ძაბვის საკმარისი მნიშვნელობა აქვს მიკრო კონტროლერის და ანტენის უწყვეტი მუშაობისათვის.

4.4 ენერგო მოხმარების პროცესი

1-4 ექსპერიმენტალურმა დაკვირვებებმა უკეთესად განსაზღვრეს კვანძების ფუნქციონირების შეწყვეტის პროცესი („სიკვდილის“ პროცესი). კვანძების, რამოდენიმე საათიანი უწყვეტი მუშაობის შემდეგ, მათ ფუნქციონირების პრობლემები ეწყებათ და ნორმალურ მდგომარეობას არ უბრუნდებიან მანამ სანამ მათი ძირეული გადატვირთვა არ მოხდება. ერთ-ერთი კვანძი დავუკავშირეთ MIB510 კვების წყაროს, რომ თავიდან აგვეცილებინა კვებასთან დაკავშირებული პრობლემები. რამოდენიმე საათიანი მუშაობის შემდეგ კვანძს მაინც დაეწყო ანალოგიური პრობლემები და საჭირო გახდა მისი გადატვირთვა. ამასთან ვაწარმოეთ კვლევები ინტერნეტში პროგრამულ უზრუნველყოფასთან წამოჭრილი ხარვეზების აღმოსაენად, ასეთის არსებობის შემთხვევაში. აღმოჩნდა, რომ CC1000RadioIntM.nc პროგრამაში ორი ბრძანება სრულდებოდა არასწორად და საჭიროებდა კორექტირებას, ეს ბრძანებები მნიშვნელოვან როლს ასრულებდნენ კვანძის კავშირის დამყარების პროცესში. პროგრამული დეფექტი გასწორება მოხდა [10]-ში გათვალისწინებული რეკომენდაციების მიხედვით, თუმცა პრობლემა რომელიც პროგრამული დეფექტის გასწორების შემდეგ უნდა აღმოფხვრილიყო ისევ დარჩა. აქედან გამომდინარე სამუშაო დრო არ არის დამოკიდებული ცალსახად მხოლოდ კვანძში არსებულ და გამოყენებულ ენერჯის რაოდენობაზე. პრობლემის სავარაუდო მიზეზებად მივიჩნიეთ მოწყობილობის პროგრამული ან აპარატურული გაუმართაობები. ასევე ეჭვის საგანს წარმოადგენდა პროგრამული ენა რომელსაც ვიყენებდით და ეს იყო ობიექტზე ორიენტირებული პროგრამირების ენა, რომელიც ჩვენი აზრით ბლომდე არ მიესადაგება მოცემული მოწყობილობისადმი დასმული ამოცანების შესრულებას. რადგან nesC იყენებს უამრავ ბიბლიოთეკას, არსებულსა თუ ახალს რომელთა უმრავლესობაც არ არის სერტიფიცირებული. ალტერნატიული მეთოდები კვანძის სასიცოცხლო დროის გამოსათვლელად GSP მეთოდის და სხვა პროტოკოლების შემთხვევაში არის ის, რომ შესწავლილ იქნას კვანძის მდგომარეობა მის სხვადასხვა ფაზაში ყოფნის

დროს, როგორცაა: გადაცემის პროცესი, ნორმალური მდგომარეობის პროცესი, მიღების პროცესი და მიკროკონტროლერის მუშაობაზე დაკვირვება როდესაც მიკროკონტროლერი მუშაობს ხოლო რადიო მიმღები გამორთულია. პროცესების ამ მიმდევრობით, განხილვისას და 3.7.3 პარაგრაფში განხილული პროცედურით, რომელიც ნახ. 33 გამოსახული გვიჩვენებს შედეგების ერთ-ერთ მაგალითს.



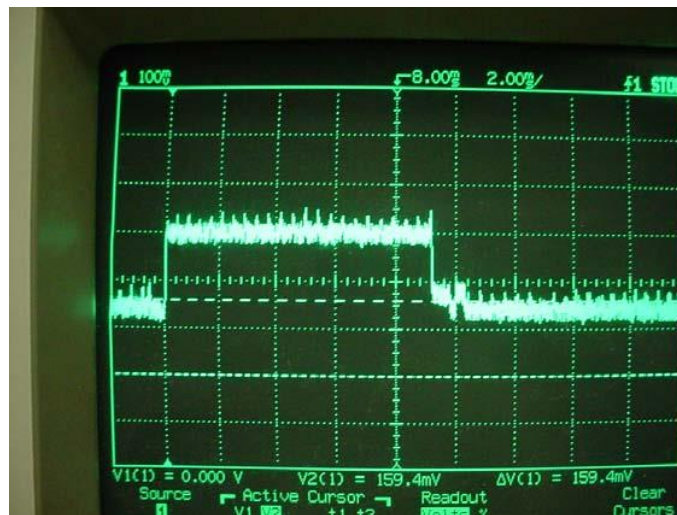
ნახ 33. რეზისტორში არსებული ძაბვის მნიშვნელობა, 903MHz, 5dBm

ამ ტიპის რადიოტალის გამოსახულება გვამღევს იმის საშუალებას, რომ დავაკვირდეთ თუ როდის მოხდა ფრეიმის გადაცემის პროცესი, ანუ როდესაც მიმღები აქტიურ მდგომარეობაში იმყოფებოდა (თუმცა მხოლოდ მიღების რეჟიმში ფუნქციონირებდა) და როდესაც რადიო მიმღები დეაქტივირებულ რეჟიმში იმყოფებოდა. ფრეიმის გადაცემის პროცესში, რაც შეადგენს 9მწმ_ს, ვხვდებით დენის მოხმარების პიკურ მნიშვნელობებს რომელიც სიგნალის ფორმის ცვალებადობაში გამოიხატება. ამ პროცესის უფრო დეტალიზებულ სახეს გვიჩვენებს ნახ. 34, რომელზეც გამოსახულია გადასვლა დეაქტივირებული რადიო მიმღებიდან აქტიურ რეჟიმში. ნახაზის მიხედვით გადასვლის პროცესი ექსპონენციალური განაწილების სახეს იძენს.



ნახ 34. რეზისტორზე ძაბვის მიწოდების პროცესის ილუსტრირება რადიო მიმღების დეაქტივირებული მდგომარეობიდან აქტიურში გადასვლის დროს

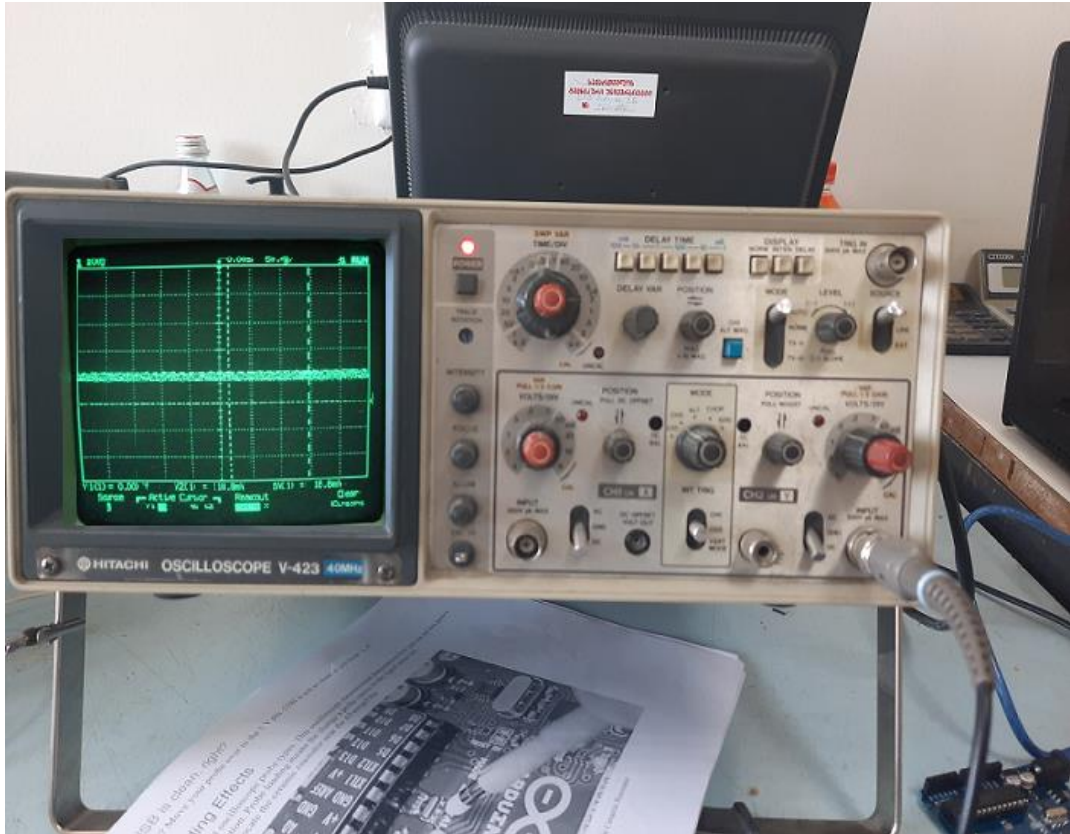
ნახ. 35 გვიჩვენებს სიგნალის ძაბვის მნიშვნელობას როდესაც ფრეიმი გაგზავნილია. როგორც ნახაზიდან ჩანს გადაცემის სტადიიდან გადასვლის პროცესს მდორე მდგომარეობაში ასევე ექსპონენციალური განაწილების სახე აქვს.



ნახ 35. რეზისტორზე ძაბვის მნიშვნელობა ფრეიმის გადაცემის პროცესში

ნახ. 36 გვიჩვენებს ძაბვის სიგნალის მნიშვნელობას გაზომილს ფრეიმის მიღების პროცესში, მხოლოდ ერთი კვანძის შემთხვევაში, რომელიც დაპროგრამდა მხოლოდ მიღების პროცესზე. გამომდინარე იქიდან, რომ ძაბვის სიგნალის მრუდი მუდმივ სიდიდედ რჩება, კვანძის ენერგო

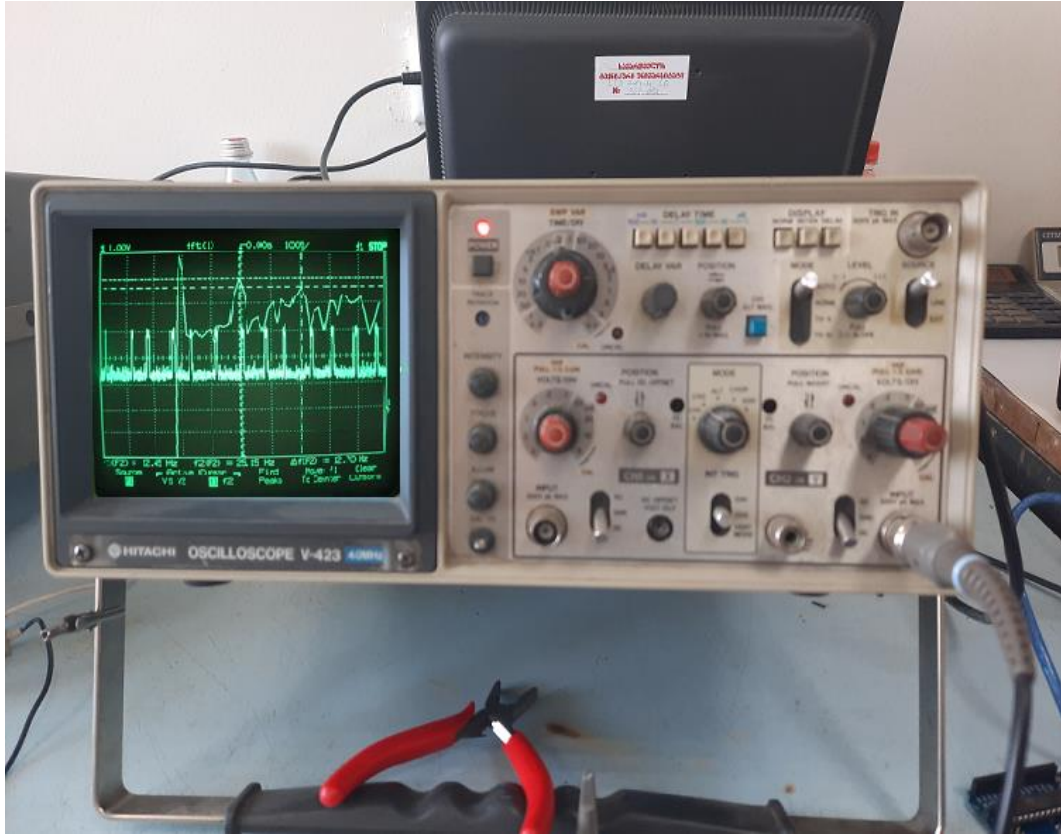
მოხმარებაც სტაბილურია, მიუხედავად იმისა კვანძი მიიღებს სიგნალს თუ მდორე მუშაობის რეჟიმში იფუნქციონირებს. ანალოგიური სიტუაცია დადასტურდა GSP პროტოკოლზე მომუშავე კვანძებშიც. ასე, რომ ენერჯის მოხმარება ამ ორი ფაზაში ყოფნის დროს მსგავსია.



ნახ 36. ძაბვის მნიშვნელობა რეზისტორზე, დამახასიათებელი მხოლოდ მიღების პროცესისათვის

გამომდინარე იქიდან, რომ გაზომვების ჩატარების დროს სიგნალს თან ახლდა ხმაური, სპექტრული ანალიზი განხორციელდა იმისათვის, რომ განსაზღვრულიყო რაიმე მნიშვნელოვანი კომპონენტის არსებობა სიგნალში. ნახ. 37 გვიჩვენებს ტალღის ფორმას, რომლის აღმოჩენაც შესაძლებელი გახდა FFT ფუნქციის საშუალებით. აქ ძირითად კომპონენტებს ვხვდებით 12,45 ჰც-ის ფარგლებში, დამახასიათებელს ამ ტიპის სიხშირისთვის. ეს სიხშირე წარმოადგენს 1 იმპულსს ყოველ 80 მწმ-ში. იმულსები წარმოადგენენ ძირითად სპექტრულ შემადგენლებს დამახასიათებელს

ოთკუთხა-ტიპის ტალღისთვის, გარდა ამისა სხვა შემადგენლებს არ ვხვდებით.



ნახ 37. გადაცემული სიგნალი, FFT

ენერგო მოხმარებასთან დაკავშირებული გაზომვები განხორციელდა ექვსი სხვადასხვა ტიპის კვანძის შემთხვევაში, რომელთა შედეგებიც ნაჩვენებია ცხრილებში 10_დან 12_ის ჩათვლით.

ცხრილი 10. რეზისტორში არსებული ძაბვის მნიშვნელობა

	რადიო მიმღები, დეაქტივირებულ მდგომარეობაშია (mV)	რადიო მიმღები, აქტივირებულ მდგომარეობაშია (mV)	გადაცემის პროცესი (mV)
საშუალო	59,22	161,35	309,54
CI 95%	1,82	1,80	1,99

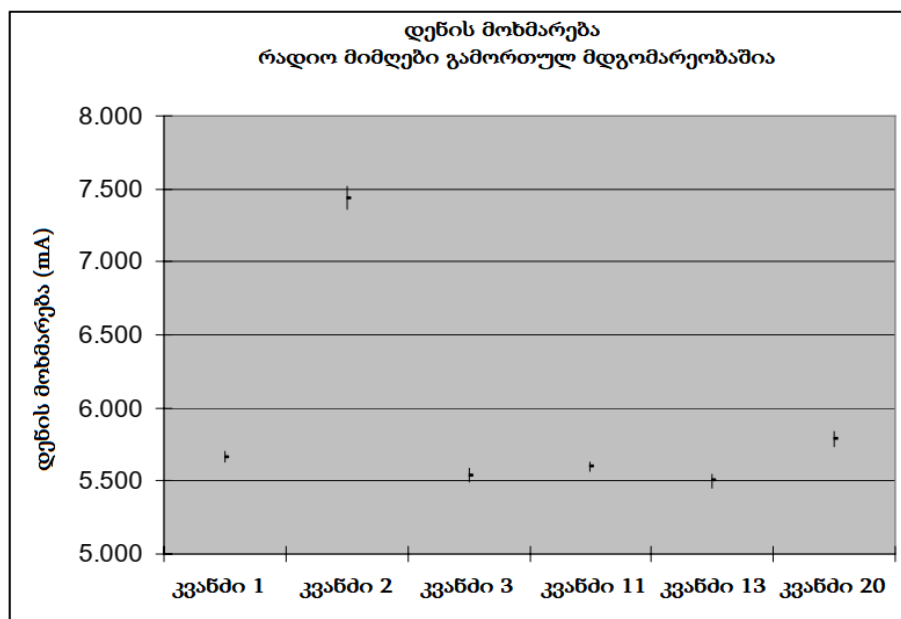
ცხრილი 11. წრედში არსებული დენის მნიშვნელობა

	რადიო მიმღები, დეაქტივირებულ მდგომარეობაშია (mA)	რადიო მიმღები, აქტივირებულ მდგომარეობაშია (mA)	გადაცემის პროცესი (mA)
საშუალო	5,92	16,14	30,95
CI 95%	0,18	0,18	0,20

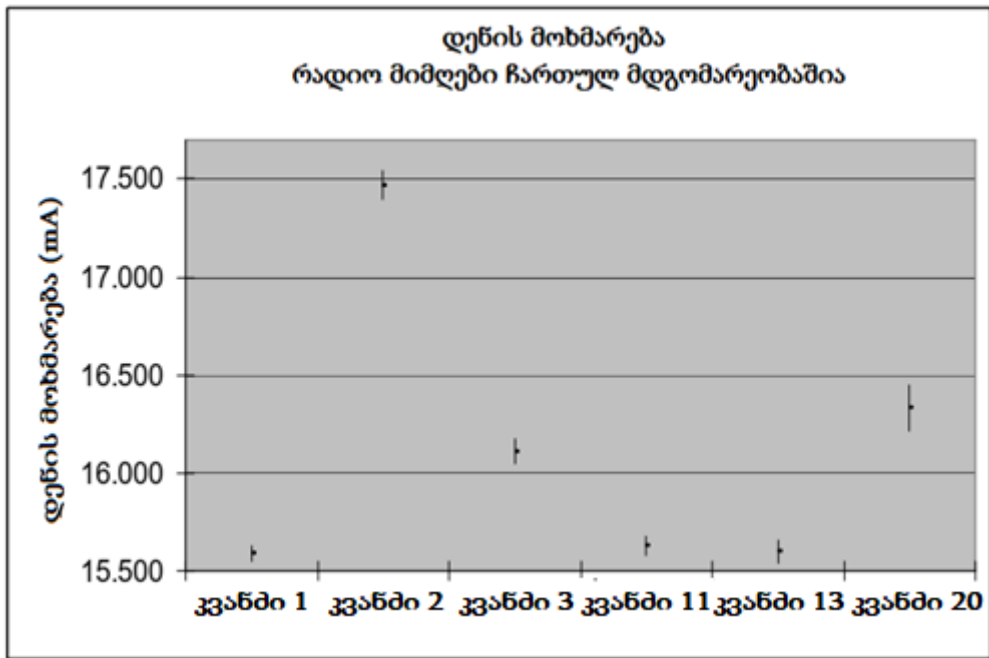
ცხრილი 12. წრედში არსებული ძაბვის მნიშვნელობა

	რადიო მიმღები, დეაქტივირებულ მდგომარეობაშია (V)	რადიო მიმღები, აქტივირებულ მდგომარეობაშია (V)	გადაცემის პროცესი (V)
საშუალო	2,91	2,81	2,66

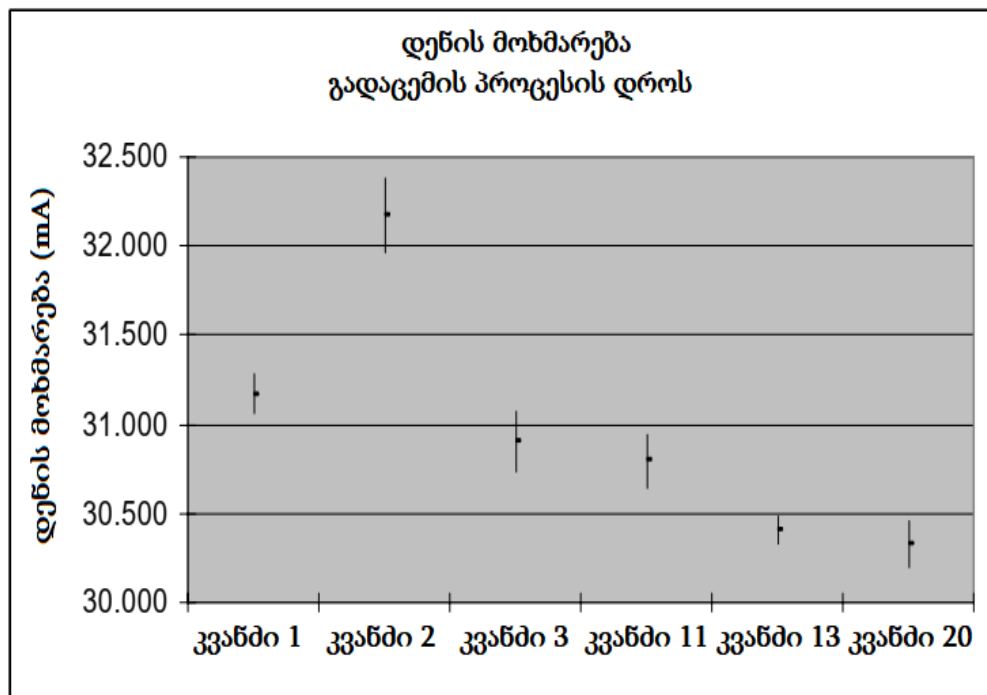
ნახ. 38_დან 40_მდე გვიჩვენებენ დენის მოხმარების ინტერვალს შესწავლილს ყველა კვანძის შემთხვევისათვის. სენსორული კვანძის ყველა მდგომარეობაში ვხვდებით ინტერვალების გადაფარვას, სწორედ ამიტომ არ შეგვიძლია ვთქვათ, რომ დენის მოხმარება არ არის სტატისტიკურად დამოუკიდებელი ყველა კვანძისთვის ყოველ მდგომარეობაში ყოფნისას.



ნახ 38. მოხმარების შედარება, გამორთულ რადიო მიმღებზე

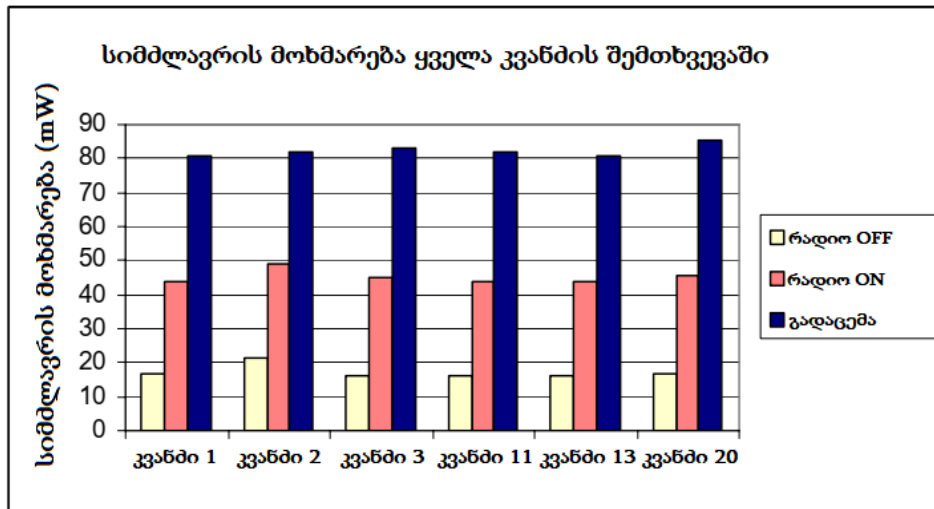


ნახ. 39. მოხმარების შედარება, ჩართულ რადიო მიმღებზე



ნახ 40. მოხმარების შედარება, გადაცემის პროცესის დროს

ნახ. 41 გვიჩვენებს სიმძლავრის მოხმარებას ყველა კვანძის შემთხვევაში ყველა რადიო სიხშირული დიაპაზონისათვის.



ნახ 41. სიმძლავრის მოხმარება ყველა კვანძის შემთხვევაში

განზოგადებული შედეგები, ნაჩვენები 10 – 12 ცხრილებში, გამოყენებულ იქნა, რომ გამოგვეთვალა ენერჯის მოხმარება ერთი კვანძის შემთხვევისთვის, შემდეგი პროცედურის დახმარებით:

$$\text{ენერჯია} = W \times t \quad (4.1)$$

ან

$$\text{ენერჯია} = V \times I \times t \quad (4.2)$$

როდესაც რადიო მიმღები გამორთულ მდგომარეობაშია, ენერჯო მოხმარება გამოიანგარიშება შემდეგნაირად:

$$\begin{aligned} \text{ენერჯია}_{\text{მიმღები-OFF}} &= 2.9V \times 5,92mA \times t \\ \text{ენერჯია}_{\text{მიმღები OFF}} &= 17,23 \times t \text{ (მლჯ)} \end{aligned} \quad (4.3)$$

სადაც, t არის დრო წამებში როდესაც რადიო მიმღები გამორთულ მდგომარეობაშია. ექსპერიმენტში გამოყენებული პროტოკოლს რადიო მიმღები პერიოდულად გამორთულ მდგომარეობაში ჰქონდა, ასე რომ ერთი საათის განმავლობაში მიმღების მუშაობამ შეადგინა 1800 წამი და მოიხმარა 31,01 ჯოული ან ექვივალენტურად, 2,96 mAh, (2.10) განტოლების მიხედვით, კვანძის ძაბვა შეადგენს 2,91ვ-ს. გააქტიურებულ რადიო მიმღებზე, გადაცემის განუხორციელებლად, ანალოგიური პროცედურა შესაძლებელია შესრულდეს შემდეგი განტოლების გამოყენებით (4.2):

$$\text{ენერჯია}_{\text{მიმღები ON}} = 2.81V \times 16,14mA \times t$$

$$ენერგია_{მიმღები ON} = 45,35 \times t \text{ (მლჯ)} \quad (4.4)$$

სადაც, t აღნიშნავს დროს როდესაც მიმღები აქტიურ მდგომარეობაში იმყოფებოდა, თუმცა არ ახორციელებდა გადაცემას. პროცესი მიმდინარეობდა შემდეგნაირად: კვანძი აგზავნის ერთ შეტყობინებას ყოველ 80 მლწმ-ის განმავლობაში, შეტყობინების ხარგრძლივობა შეადგენს 90 მლწმ-ს, მიმღები ჩართულ მდგომარეობაშია და არ ახორციელებს გადაცემას 71 მლწმ-ის განმავლობაში, ანუ ერთი ციკლის პერიოდში. 2,5 წამის შემდეგ მიმღები ისევ გადადის აქტიურ მდგომარეობაში, საერთო ჯამში შესასრულებელია 31,25 ციკლი ერთი ფრეიმის გადაცემა/მიღებისათვის.

$$31,25 \text{ ციკლი} \times 71 \text{ მლწმ} = 2,22 \text{ წმ}$$

აქედან გამომდინარე, აქტიური რადიომიმღების პროპორციული მდგომარეობა მხოლოდ მონიტორინგის რეჟიმში მყოფ რადიომიმღებთან გამოითვლება შემდეგნაირად

$$2,22 \text{ წმ} / 2,25 \text{ წმ} = 88,75\%$$

თუ გავითვალისწინებთ, რომ 1სთ-ის განმავლობაში 1597,5წმ-ია (ამ შემთხვევაში 88,75% ითვლება 1სთ-ის ნახევარ დროდ რადგანაც 50% მოდის სამუშაო ციკლზე) როდესაც რადიო მიმღები აქტიურია მაგრამ გადაცემას არ ახორციელებს, ენერგია რომელიც ესაჭიროება მიმღებს იმუშაოს მხოლოდ მონიტორინგის რეჟიმში შეადგენს 72,45 ჯოულს (4.4) განტოლების მიხედვით ან 7,16mA-ს. ჩვენ ასევე შეგვიძლია გამოვიანგარიშოთ 1 ბიტის მიღებაზე დახარჯული ენერგია, თუ კი გვეცოდინება 1 ბიტი ინფორმაციის ხანგრძლივობა. თუ კი გავითვალისწინებთ Hill et. al in [23] მიერ მიღებულ ერთეულს რომელიც შეადგენს 52მკწმ-ს, მაშინ (4.4) განტოლების შედეგად მივიღებთ:

$$ენერგია_{მიღებაზე} = 45,35 \times 52 \times 10^{-6} \text{ მლჯლ/ბიტი}$$

$$ენერგია_{მიღებაზე} = 2,36 \text{ მლჯლ/ბიტი}$$

ანალოგიური პროცედურების ჩატარების შემდეგ რაც გადაცემის პროცესზე განვახორციელეთ, მივიღებთ შემდეგ განტოლებას

$$ენერგია_{TX} = 82,33 \times t \text{ (მლჯ)} \quad (4.5)$$

სადაც t არის დრო წამებში როდესაც გადამცემი ახორციელებდა ფრეიმის გადაცემას. ამ სახეცვლილ ფორმაში დრო არის 9.0მლწმ, აქედან გამომდინარე გადაცემისას მოხმარებული ენერგია შეადგენს 740,97 მკჯოულს თითოეული გადაცემული ფრეიმისთვის. 2,5წმ-ის განმავლობაში კვანძი გადასცემს 31,25 ფრეიმს. ეს იგივეა ითქვას, რომ გადაცემა ხდება ყოველ 0,28წმ-ის განმავლობაში 2,5 წამიან ციკლებში. ეს წარმოადგენს გადაცემაზე დახარჯული დროის 11,25%. ერთი საათის განმავლობაში ეს არის 202,5 წამი, რაც ნიშნავს იმას რომ კვანძი მოიხმარს 16,67 ჯოულს (აქვე მიჩნეულია კვანძის სამუშაო ციკლი) ან 1,74mA. ერთი ბიტის გადაცემაზე მოსული ენერგიის დანახარჯი შესაძლებელია გამოითვალოს (4.5) განტოლების საშუალებით:

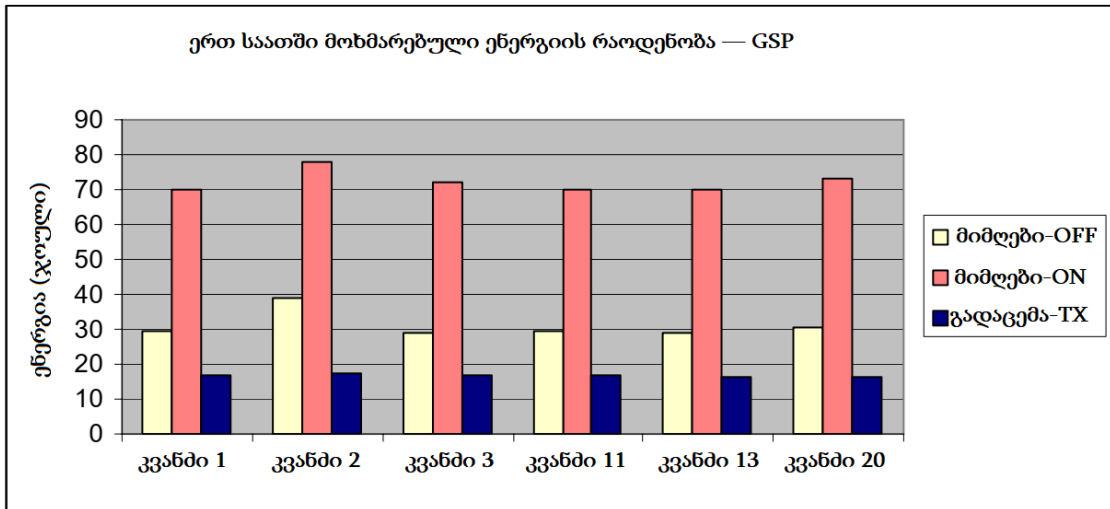
$$\text{ენერგია}_{\text{TX/ბიტზე}} = [82,33 \times 52 \times 10^{-6}] \text{მლჯლ/ბიტზე}$$

$$\text{ენერგია}_{\text{TX/ბიტზე}} = 4,28 \text{მკჯლ/ბიტზე}$$

ცხრილი 13. ენერგიის მოხმარების ჯამური მნიშვნელობები

კვანძის მდგომარეობა	მიმღები-OFF (მლჯოული)	მიმღები-ON (მლჯოული)	გადაცემა-TX (მლჯოული)	ენერგია 1ბტ-ზე-TX (მკჯოული)	ენერგია 1ბტ-ზე-RX (მკჯოული)
გამოსახულება	$17,23 \times \tau_1$	$45,35 \times \tau_2$	$82,23 \times \tau_3$	4,28	2,36

1 ბიტზე მოსული ენერგიის მოხმარების მნიშვნელობები დამოკიდებულია დროის იმ პერიოდზე, რაც ესაჭიროება ბიტს ინფორმაციის გადასაცემად, აქედან გამომდინარე ეს პროცესი დამოკიდებულია გადაცემული მონაცემების სიხშირეზე. ეს მნიშვნელობები სამართლიანია მხოლოდ 19,2 კბიტ/წმ სიჩქარისთვის. ნახ. 42 გვიჩვენებს ენერგიის მოხმარებას ინდივიდუალური კვანძისათვის, მომუშავეებს GSP პროტოკოლზე.



ნახ. 42. 1სთ-ის განმავლობაში მოხმარებული ენერჯის რაოდენობა - GSP

ჯამური ენერჯის გამოანგარიშება ერთი საათის განმავლობაში ერთი კვანძის შემთხვევაში შესაძლებელია გამოითვალოს შემდეგი გამოსახულებით:

$$E = \sum_{i=1}^3 P_i \tau_i \quad (4.6)$$

სადაც, P_i გამოხატავს სიმძლავრის მოხმარებას კვანძის ყოველ მდგომარეობაში, ხოლო τ_i შეადგენს დროს წამებში რაც კვანძმა დაყო თითოეულ მდგომარეობაში ყოფნის დროს. 1 მიმღები-OFF, 2 მიმღები-ON (მონიტორინგის ან მიღების რეჟიმში), 3 გადაცემა. აქედან გამომდინარე GSP მოდელის შემთხვევაში მოხმარებული ენერჯია 1სთ-ის განმავლობაში, თითოეული კვანძის შემთხვევაში ინდივიდუალურად ხორციელდება, შესაძლებელია გამოყენებულ იქნას თავდაპირველად მიღებული მნიშვნელობები:

ენერჯია, GSP 1სთ= 31,00ჯოული+72,45 ჯოული+16,67ჯოული

ენერჯია, GSP 1სთ=120,12 ჯოული

ანალოგიურ აპლიკაციებთან შესაძლებელია შედარდეს ენერჯის მოხმარება. Shnayder et. al in [26] მაგალითი გვიჩვენებს ენერჯის მოხმარების გაზომვას და სიმულირებას რამოდენიმე აპლიკაციის შემთხვევაში. ერთ-ერთი ნაშრომშიც არის გამოყენებული, რომელსაც ეწოდება CntToRfm. აპლიკაციის გადასაცემას ესაჭიროება 1,985 ჯოული 60

წმ-ის განმავლობაში. თუმცა პაკეტების სიხშირის ზუსტი მნიშვნელობა არ ფიქსირდება, არც პაკეტის ზომა, არც გადაცემაზე მოსული სიმძლავრის მნიშვნელობა და გადაცემის სიხშირე, ასე რომ შედარება შესაძლოა არა კორექტული იყოს ჩვენი მხრიდან. მიუხედავად ამისა შესაძლებელია ვივარაუდოთ, რომ აპლიკაცია მოიხმარს თითქმის ანალოგიური რაოდენობის ენერგიას რასაც GSP, რადგან საბოლოოდ მომხმარებელი ენერგია GSP-თან ახლოს არის, რაც შეადგენს 119,1 ჯოულს. CntToRfm არ იყენებს არანაირი სახის გადაცემის პროტოკოლს რადგან იგი ახორციელებს გადაცემას, გადამცემიდან მიმღების მიმართულებით, ერთი ნახტომის მეთოდით. დენის მოხმარება [26] მიხედვით ემთხვევა ჩვენს მიერ განსაზღვრულ მნიშვნელობას. ცხრ. 14 გვიჩვენებს ამ მნიშვნელობებს.

ცხრილი 14. GSP პროტოკოლის დენის მოხმარების შედარება [26]-თან

	მიმღები-OFF (mA)	მიმღები-ON (mA)	გადაცემა (mA)
GSP პროექტი	5,92	16,14	30,95
შედეგი [26] მიხედვით*	8,0	15,0	21,8

*გასათვალისწინებელია: [26] მოცემული მონაცემები არ იყო შედარებული ჩვენს მიერ შედგენილი ექსპერიმენტის ანალოგიასთან. რაც ასევე შესაძლებელია გადამოწმდეს ცხრ. 11-ში. გამორთული მიმღების მნიშვნელობა იგივეა რაც ცხრ. 11-ში აქტიური CPU-ს მნიშვნელობით. აქტიური მიმღების მნიშვნელობა გვიჩვენებს მიღებს დამატებული აქტიური CPU-ს მნიშვნელობა, უახლოესი გადაცემის სიმძლავრის მნიშვნელობა ნაჩვენები ცხრ. 11-ში, რაც შეადგენს 6dBm-ს, ხოლო მოხმარებული დენის მნიშვნელობაა 6dBm-თან შესაბამისი, რომელიც ასევე შეიცავს აქტიური CPU-ს და მიმღების-TX მნიშვნელობებს.

შესაძლებელია ასევე გამოითვალოს მიკროკონტროლერის მიერ მოხმარებული ენერგიის რაოდენობა, რომელიც ასრულებს მხოლოდ ერთ ფუნქციას. 8 მგჰც ტაქტური სიხშირის არსებობის შემთხვევაში, ერთი ინსტრუქციის შესრულებას ესაჭიროება 125 ნწმ. Si გამოყენებული

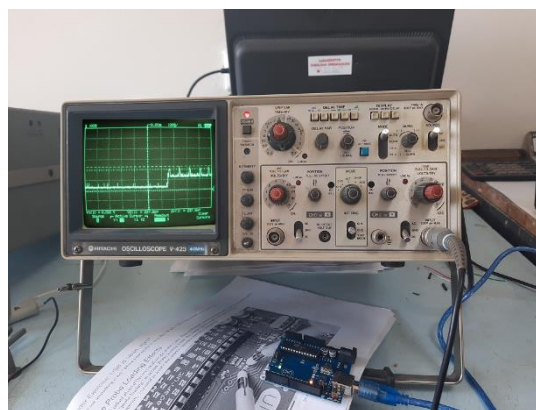
მნიშვნელობით (მიმღები დეაქტივირებულია და მხოლოდ მიკროკონტროლერი ფუნქციონირებს), $17,23 \times 1256 \text{წმ} = 2,156 \text{ჯოული}$.

4.5 განსხვავებული გადაცემის სიმძლავრის დონეები

ყოველი პროცედურა რომელიც წინა სცენარში განვიხილეთ მიიჩნევა ყველაზე ცუდ შემთხვევებად, როდესაც კვანძები გვანძები გადასცემენ მაქსიმალური სიმძლავრის დონით. არსებობს კიდევ ორი განსხვავებული გადაცემის სიმძლავრის დონე (0dBm და -20dBm) რომლებიც ასევე დავტესტეთ, რომ დაგვედგინა თუ როგორი ეფექტი ექნებოდა ენერგო მოხმარების პროცესზე. ეს დონეები შერჩეულ იქნა კვანძიდან გამომდინარე, რომლებიც შესაძლებელია დაპროგრამდეს კვანძში როგორც უმცირესი და საშუალო გადაცემის სიმძლავრის დონეები [7].

4.5.1 შედეგები 0dBm-ის შემთხვევაში

ნახ 43. წარმოადგენს ძაბვის მნიშვნელობას რეზისტორზე 0dBm-ის შემთხვევაში. ტალღის ფორმა 0dBm_ის შემთხვევაში იგივეა რაც მიღებულ იქნა 5dBm_ის შემთხვევაში, მაგრამ გადაცემის დროს გამოყენებული ძაბვის მნიშვნელობები მცირეა. ცხრ. 15_დან ცხრ. 18_ის ჩათვლით ცხრილები გვიჩვენებენ გაზომვების ანალიზს. ენერგო მოხმარება 0dBm_ის შემთხვევაში მცირეა 5dBm_ის შემთხვევასთან შედარებით.



ნახ. 43. ძაბვის მნიშვნელობა რეზისტორზე, 0dBm

ცხრილი 15. ძაბვის მნიშვნელობა რეზისტორზე, 0dBm გადაცემის სიმძლავრის შემთხვევაში

	რადიო მიმღები, დეაქტივირებულ მდგომარეობაშია (mV)	რადიო მიმღები, აქტივირებულ მდგომარეობაშია (mV)	გადაცემის პროცესი (mV)
საშუალო	42,97	149,85	213,37
CI 95%	0,27	0,38	0,58

ცხრილი 16. დენის მნიშვნელობა წრედში, 0dBm გადაცემის სიმძლავრის შემთხვევაში

	რადიო მიმღები, დეაქტივირებულ მდგომარეობაშია (mA)	რადიო მიმღები, აქტივირებულ მდგომარეობაშია (mA)	გადაცემის პროცესი (mA)
საშუალო	4,30	14,99	21,34
CI 95%	0,03	0,04	0,06

ცხრილი 17. კვანძში არსებული ძაბვის მნიშვნელობა, -20dBm.

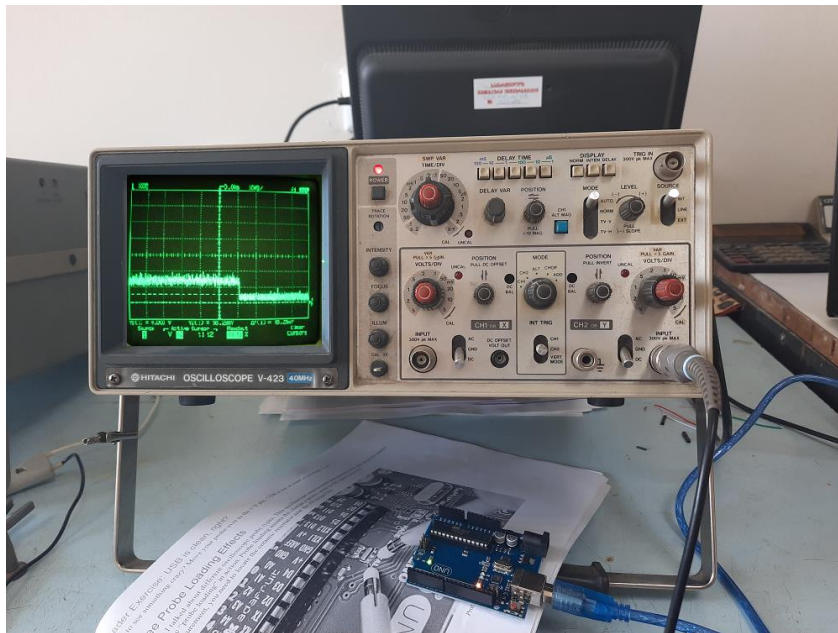
	რადიო მიმღები, დეაქტივირებულ მდგომარეობაშია (V)	რადიო მიმღები, აქტივირებულ მდგომარეობაშია (V)	გადაცემის პროცესი (mV)
საშუალო	2,93	2,82	2,76

ცხრილი 18. კვანძის მიერ მოხმარებული სიმძლავრის მნიშვნელობა, -20dBm.

	რადიო მიმღები, დეაქტივირებულ მდგომარეობაშია (mW)	რადიო მიმღები, აქტივირებულ მდგომარეობაშია (mW)	გადაცემის პროცესი (mW)
მინიმალური	16,54	42,20	58,73
საშუალო	16,61	42,30	58,88
მაქსიმალური	16,69	42,41	59,03

4.5.2 შედეგები -20dBm-ის გამოყენების შემთხვევაში

ნახ. 44 გვიჩვენებს შედეგს, მიღებულს მინიმალური გადაცემის სიმძლავრით, სადაც ტალღის ფორმა არ არის ისე კარგად განსაზღვრული როგორც ეს წინა შემთხვევაში იყო. ენერჯის მოხმარება აშკარად განსხვავდება როდესაც რადიო მიმღები აქტიურია ან დეაქტივირებულია, თუმცა ნახაზზე არ გვხვდება პერიოდული პიკური მნიშვნელობები, რომლსაც ყოველგვარი მიზეზის გარეშე შეგვიძლია მივაწეროთ ფრეიმის გადაცემა. გაზომვების ფარგლებში, გადაცემა და მიღება მოხმარენ ერთიდაიგივე მნიშვნელობის ენერჯიას ერთიდაიგივე დონის -20dBm გადაცემის სიმძლავრის გამოყენების შემთხვევაში.



ნახ 44. ძაბვა რეზისტორზე, -20dBm

ცხრ. 19-დან ცხრ. 22-მდე ცხრილებში მოცემულია გაზომვების შედეგები. მოცემული დონეები საკმაოდ მსგავსია პირველი შემთხვევასთან (გადაცემის სიმძლავრის მნიშვნელობა 5dBm). მაგრამ, როგორც გადაცემაში არ ვხვდებით პიკურ მნიშვნელობებს, -20dBm-ზე ენერჯის მოხმარებაც ანალოგიურია. სხვა მნიშვნელოვანი დეტალი მოპოვებული ამ გაზომვების შედეგად გვხვდება გადაცემის სიმძლავრის მნიშვნელობაში, რომელიც გვიჩვენებს, რომ გადამცემი და მიმღები ანტენები ერთმანეთისაგან

დაახლოებით 25სმ-ით მაინც უნდა იყონ დაშორებული, ოპტიმალური გადაცემა-მიღება, რომ განხორციელდეს.

ცხრილი 19. ძაბვის მნიშვნელობა რეზისტორში, -20dBm_ზე.

	რადიო მიმღები, დეაქტივირებულ მდგომარეობაშია (mV)	რადიო მიმღები, დეაქტივირებულ მდგომარეობაშია (mV)
საშუალო	56,56	160,33
CI 95%	0,24	0,51

ცხრილი 20. წრედში გამავალი დენის მნიშვნელობა, -20dBm_ზე.

	რადიო მიმღები, დეაქტივირებულ მდგომარეობაშია (mA)	რადიო მიმღები, აქტივირებულ მდგომარეობაშია (mA)
საშუალო	5,66	16,03
CI 95%	0,02	0,05

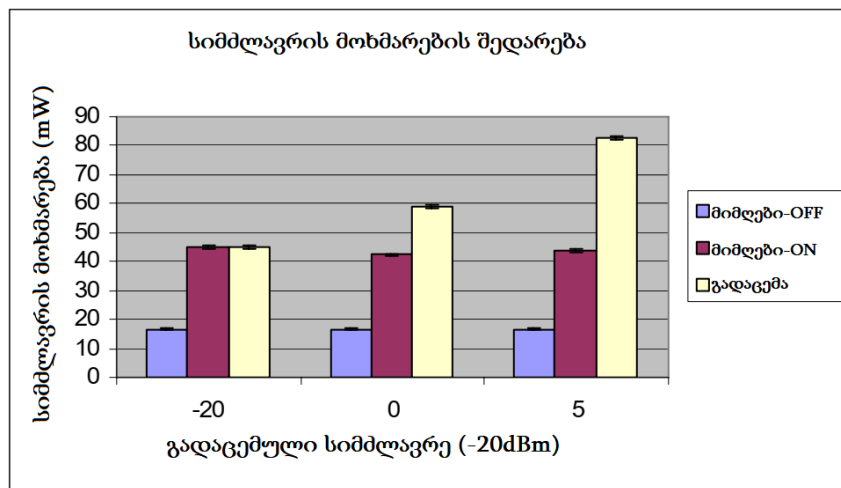
ცხრილი 21. კვანძში არსებული ძაბვის მნიშვნელობა, -20dBm.

	რადიო მიმღები, დეაქტივირებულ მდგომარეობაშია (V)	რადიო მიმღები, აქტივირებულ მდგომარეობაშია (V)
საშუალო	2,92	2,81

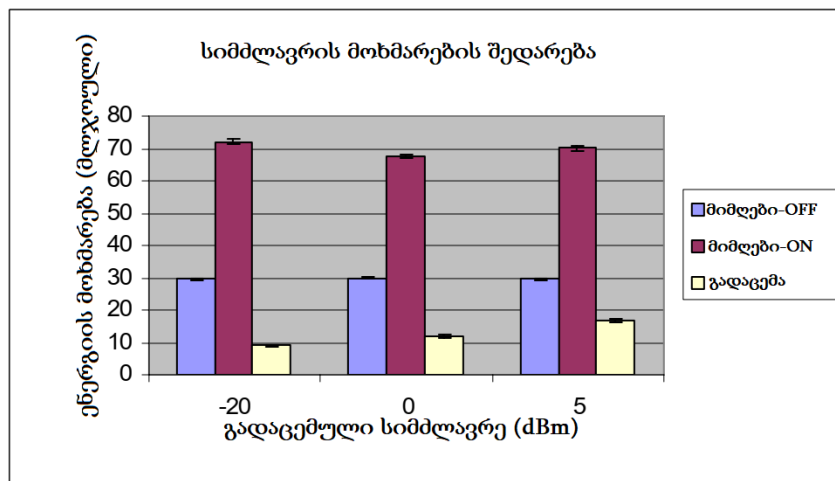
ცხრილი 22. კვანძის მიერ მოხმარებული სიმძლავრის მნიშვნელობა, -20dBm.

	რადიო მიმღები, დეაქტივირებულ მდგომარეობაშია (mW)	რადიო მიმღები, აქტივირებულ მდგომარეობაშია (mW)	გადაცემის პროცესი (mW)
მინიმალური	16,43	44,96	44,96
საშუალო	16,50	45,10	45,10
მაქსიმალური	16,56	45,23	45,23

ნახ. 45 და ნახ. 46 ილუსტრაციას აკეთებენ სიმძლავრისა და ენერჯის მოხმარების მნიშვნელობებზე სამი განსხვავებულ რადიო მიმღების მდგომარეობასა და სამ განსხვავებულ გადაცემის სიმძლავრის დონეების შემთხვევაში. ნახაზებზე ჩვენების მნიშვნელობებია 95% C.I. ერთი საათის განმავლობაში სრული ენერჯის მოხმარება საკმაოდ ემთხვევა მნიშვნელობებს -20dBm_ზე და 0dBm_ზე: 110.9 და 109.4 ჯოული. 5dBm-ის მნიშვნელობაზე ჯამური ენერჯის მოხმარება შეადგენს 125.5 ჯოულს.



ნახ 45. სიმძლავრის მოხმარების შედარება



ნახ 46. ერთ საათში ენერჯის მოხმარება GSP მოდელის მიხედვით, რადიო-მიმღები აქტივირებული

4.6 სავარაუდო სამუშაო დროის გამოანგარიშება

ტრაფიკზე ორიენტირებული ენერჯო მოხმარების მონაცემებზე დაყრდნობით შესაძლებელია გამოითვალოს სენსორული ქსელის სამუშაო

დრო განსხვავებული პროტოკოლების შემთხვევაში, მანამ სანამ ცნობილია თუ რა დროის რა მონაკვეთი დაჰყვეს ამა თუ იმ ფაზაში ყოფნის დროს. როგორც წინა გამოთვლების შემთხვევაში გავიანგარიშეთ მოხმარება ერთი კვანძის შემთხვევაში რომელიც იყენებდა GSP მეთოდს, და გაანგარიშება ჩატარდა 1 საათის დაკვირვების პერიოდში. ხოლო იმ შემთხვევაში როდესაც რამოდენიმე კვანძი მუშაობს GSP მეთოდის გამოყენებით, კალკულაციები სხვა გვარად წარმოებს, რადგან პირველ რიგში ქსელში პროტოკოლი რამოდენიმე მოწყობილობით უნდა გაჯერდეს, რაც თავისთავად ზრდის დატვირთვას ქსელზე. ნებისმიერ შემთხვევაში შესაძლებელია მოიძებნოს კვანძების ენერგო მოხმარების ზედა ზღვარი, რომლის და ელემენტების განმუხტვის მრუდის საშუალებით, გამოითვალოს სამუშაო დრო. ამ ნაწილში ჩვენ გამოვითვლით კვანძების სამუშაო დროს, კვანძისთვის ყველაზე უარყოფითი სცენარის შემთხვევაში და გამოვიყენებთ სპეციფიურ აპლიკაციებს ექსპერიმენტულ კვლევებში.

პროტოკოლით განსაზღვრული ვარიანტით აპლიკაცია აგზავნის პაკეტებს ყოველ 80 მლწმ-ში. თითოეულ პაკეტს გაგზავნა-მიღებაზე ესაჭიროება 9.0 მლწმ. პაკეტების მიღება-გადაცემის სცენარი ვითარდება შემდეგნაირად: როდესაც სენსორული კვანძი მიიღებს ინფორმაციულ პაკეტს იგი მის დაუყოვნებლივ გადაცემას მოახდენს. როგორც ნახ. 12 ნაჩვენებია „დროითი ფრეიმი სტრუქტურა“, საჭიროა ჯერ გადაიცეს ფრეიმი და ამის შემდეგ კვანძი გადადის პასიურ მდგომარეობაში. ამის ფორმულირება შესაძლებელია შემდეგი სახით:

$$TF = B + SwTx + TxTime + SwRx \quad (4.7)$$

სადაც,

- B - უკუმინართულებით გადაცემის პერიოდია.
- SwTx - დროის პერიოდი რაც ესაჭიროება რადიო-მიმღებს გადაცემის მომზადებისთვის. საშუალოდ ეს დრო შეადგენს 250 მკწმ-ს [16].
- TxTime - ფრეიმის გადაცემისთვის საჭირო დროის პერიოდი.

- SwRx - დროის პერიოდი რაც ესაჭიროება რადიო-მიმღებს მიღებისთვის აქტივაციისათვის. იგულისხმება იგივე დროის მნიშვნელობა, რაც SwTx-ის შემთხვევაში.

გაჯერების პროცესი გულისხმობს სენსორული კვანძის მიერ დიდი რაოდენობით ინფორმაციული პაკეტების მიღების პროცესს, ენერგო მოხმარების უარესი პროცესი გულისხმობს, რომ სენსორულმა კვანძმა მოახდინოს დიდი რაოდენობით პაკეტების მიღება-გადაცემა როდესაც რადიო მიმღები აქტიურ ფაზაშია. ნახ. 23 ამ პროცესის თვლასაჩინო მაგალითია.

ცხრილი 23. კავშირის პროცესი ენერჯის მოხმარების უარეს შემთხვევაში - GSP

B	SwTx	TxTime	SwRx	RxTime	B	SwTx	TxTime	SwRx
---	------	--------	------	--------	---	------	--------	------

უარესი სცენარის შემთხვევაში, გვხვდება ციკლური დრო რომელიც მეორდება მთელი T_{ON} პროცესის პერიოდში (სამუშაო პროცესში). ციკლური დრო T გამოითვლება შემდეგნაირად:

$$T=B+SwTx+TxTime+SwRx+RxTime \quad (4.8)$$

ან შემდეგნაირად,

$$T=B+2SwTx+RxTime+TxTime \quad (4.8)$$

სადაც,

ყველა დროის ნიშნული იგივეა რაც წინა შემთხვევაში, ხოლო RxTime არის ფრეიმის მისაღებად საჭირო დროის მონაკვეთი. ციკლების რიცხვი როდესაც T_{ON} აქტიურ ფაზაშია გამოითვლება შემდეგნაირად:

$$N=T_{ON}/T \quad (4.9)$$

იმის ცოდნის გათვალისწინებით, რომ B, SwTx და Rx-დრო მიეკუთვნება აქტიური რადიო არხის ფაზას, დრო თითოეული მდგომარეობისთვის შესაძლებელია გამოითვალოს შემდეგნაირად:

$$S_1 \text{ დრო}=T_{OFF} \quad (4.10)$$

$$S_2 \text{ დრო}=N \times (B+2SwTx+Rx_დრო) \quad (4.11)$$

$$S_3 \text{ დრო}=N \times Tx_დრო \quad (4.12)$$

(4.10), (4.11) და (4.12)-ში მოცემული ფორმულები (4.8)-ში მოცემულ ფორმულასთან ერთად შესაძლებელია გამოყენებულ იქნას ენერგო მოხმარების ყველაზე უაროფიტი სცენარის გაანგარიშებისთვის GSP პროტოკოლის ერთი სამუშაო ციკლის შესრულების პროცესის შემთხვევაში, ეს ასევე შესაძლებელია ფორმულირებულ იქნას შემდეგი სახით:

$$E(t)_{1 \times \text{სამუშაო ციკლი}} = S_1(T_{\text{OFF}}) + S_2(N \times (B + 2S_w T_x + R_x_{\text{დრო}})) + S_3(N \times T_x_{\text{დრო}}) \quad (4.13)$$

იმის გათვალისწინებით თუ რამდენი სამუშაო ციკლია ერთი საათის განმავლობაში და ენერჯის კონვერტაციით → დენში (2.10) განტოლების გამოყენებით ვიღებთ:

$$E(t) = \frac{D}{3600} x_{i=1}^3 \frac{S_i \times \text{სამუშაო დრო}}{V_i} \quad (4.14)$$

სადაც, D წარმოადგენს სამუშაო ციკლის რაოდენობას შესრულებულს 1სთ-ის განმავლობაში, ხოლო V_i წარმოადგენს კვანძის მიერ მოხმარებულ ძაბვას ყოველი მდგომარეობის დროს. (4.14) განტოლება შედეგად მოგვცემს ენერჯის მოხმარებას მილიამპერებში (mAh).

ელემენტის განმუხტვის მრუდის გაანალიზების შედეგად, რომელიც ნაჩვენებია ნახ. 2-ზე, მრუდი რჩება წრფივ მდგომარეობაში დაახლოებით ~1,28 ვოლტის ფარგლებში, ხოლო როდესაც ელემენტი დაკარგავს თავისი ტევადობის დაახლოებით 80% ($160\text{mA} \times 8\text{სთ-ზე}$ ან $320\text{mA} \times 4\text{სთ-ზე}$), მოხდება ძაბვის ვარდნა. ანალოგური კრიტერიუმების მორგება შეგვიძლია ნებისმიერ ტევადობაზე-C, რომლის გაზომვაც ხორციელდება mAh-ში, ამ შემთხვევაში გამოყენებული ელემენტის სასიცოცხლო დრო შესაძლებელია ფორმულირებულ იქნას შემდეგნაირად:

$$L = 0,8 \times C / E(t) \quad (4.15)$$

ამ განტოლებების და შეგროვებული მონაცემების გამოყენებით, GSP პროტოკოლის მოსალოდნელი სამუშაო დრო ჩვენს მიერ შერჩეული მონაცემებით შესაძლებელია შემდეგნაირად გამოითვალოს. ავიღოთ უმცირეს მნიშვნელობად 0,416 მლწმ, ყველაზე უარყოფითი სცენარი სასიცოცხლო დროისთვის გამოითვლება შემდეგნაირად:

- $T=0,416+2\times 0,25+9,0+9,0$
 - $T=19,916$ მლწმ-ს
- $N=2,5\text{წმ}/18,916\text{მლწმ}$
 - $N=132,16$
- $D=3600/5$
 - $D=720$
- $E(t) = \frac{720}{3600} \times \frac{17,23 \times 2,5}{2,91} \times \frac{45,35 \times 132,16 \times 9,916 \times 10^3}{2,81} \times \frac{82,33 \times 132,16 \times 9,0 \times 10^3}{2,66}$
 - $E(t)=14,55\text{mAh}$

იმ შემთხვევაში თუ კი ელემენტის ტევადობა შეადგენს 1200mA-ს, კვანძის მოსალოდნელი სასიცოცხლო დრო იქნება:

- $L=0,8 \times 1200\text{mAh}/14,55\text{mAh}$
 - $L=65,96$ სთ-ს

უარეს შემთხვევაში თითოეულ კვანძს აქვს სასიცოცხლო დრო 65,96 საათი. გამონაგარიშება მით ახლოს იქნება რეალურ სცენართან, რაც უფრო რეალურ პარამეტრებს გამოვიყენებთ რადიო მიმღე-გადამცემის აქტიურ-დეაქტივირებულ ფაზაში ყოფნის დროსთან. გაზომვები გვიჩვენებენ, რომ საშუალოდ რადიო მიმღები გამორთულ მდგომარეობაში ატარებს 2,43წმ-ს, ხოლო რადიო-მიმღების აქტიურ მდგომარეობაში ყოფნის საშუალო დროს წარმოადგენს 2,48 წამი. გამომდინარე იქიდან, რომ სხვაობა მოსალოდნელ და რეალურ მნიშვნელობებს შორის არის ძალიან მცირე, სასიცოცხლო პერიოდის გამოთვლის სხვაობაც არის რეალურსთან მაქსიმალურად მიახლოებული.

თავი 4_ის შედეგები

განხილულია Crossbow Mica2_ის ბაზაზე გამოყენებული GSP პროტოკოლის ექსპერიმენტულად მიღებული შედეგები და გაკეთებულია ანალიზი სქემა. განხილულია ქსელის სასიცოცხლო დროის გაზომვის რამოდენიმე მეთოდი. მოცემულია თითოეულ კვანძში მოხმარებული ენერჯის რაოდენობა, რომელიც გამოყენებულია მთლიანობაში ქსელის

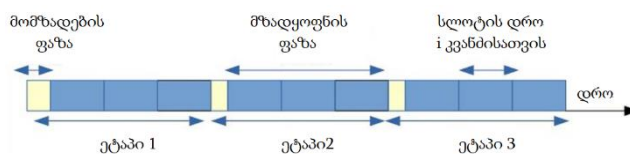
სასიცოცხლო დროის გამოსაანგარიშებლად. საბოლოოდ, კვანძში ენერჯის გამოთვლის მეთოდი განხილულია GSP და CSMA მოდელების მიხედვით.

თავი 5. ენერგო მოხმარების მინიმიზაციის ალერნატიული პროტოკოლი

5.1 უსადენო სენსორულ ქსელებში ენერგო მოხმარების მინიმიზაცია თანამედროვე მიდგომის მეთდებით

უსადენოკავშირის ქსელებში, ენერგიის ძირითადი დანახარჯი ინფორმაციის მიმოცვლაზე მოდის, ამისთვის საჭიროა ენერგიის ოპტიმიზირების პროტოკოლების გამოყენება.

სენსორული კვანძების ორგანიზების პროცესი შედგება ორი ფაზისაგან: მომზადების ფაზა და მზადყოფნის ფაზა. მომზადების ფაზაში, უსქ იყოფა კლასტერებად (კვანძების ჯგუფად). თითოეულ კლასტერში მოთავსებულია კლასტერის მმართველი კვანძი (CH). მზადყოფნის რეჟიმის ფაზაში კლასტერის შემადგენელი კვანძები უწყვეტ რეჟიმში ახორციელებენ ინფორმაციის მიმოცვლას კლასტერის მმართველ კვანძთან. კლასტერის შემადგენლობაში შემავალ თითოეულ სენსორულ კვანძს გამოყოფილი აქვს თავისი დრო შეგროვებული ინფორმაციის გადასაცემად მმართველი კვანძისათვის. ინფორმაციის მიმოცვლის პროცესი მიმდინარეობს TDMA (Time Division Multiple Access) განრიგების მიხედვით. განრიგი შემუშავებულია კლასტერის მმართველი კვანძისათვის რომელიც თავის დაქვემდებარებაში მყოფ რიგით სენსორულ კვანძებს ატყობინებს განრიგის შესახებ (ნახ 47.).



ნახ 47. TDMA ოპერაცია LEACH არქიტექტურისათვის

კლასტერის მმართველი კვანძის მოვალეობაში შედის ზედმეტი და უსარგებლო ინფორმაციის შემცირება და აგრეგაციის ტექნოლოგიის მორგება ინფორმაციის ზომის შესამცირებლად, რომ შემდეგ გადაამისამართოს ცენტრალურ სადგურზე (BS) [36].

LEACH (დაბალი ენერგო მოხმარების ადაპტიური კლასტერიზაციის იერარქია - Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) დღეს-დღეობით ყველაზე დახვეწილ პროტოკოლს წარმოადგენს მიკრო-სენსორული ქსელისათვის. მისი კონცეფცია აერთიანებს როგორც ენერგო-ეფექტურ კლასტერულ გადაცემას ასევე ინფორმაციული რესურსების ოპტიმალურ განაწილებას. LEACH საშუალებას იძლევა სენსორულმა კვანძებმა რაც შეიძლება მეტი ენერგიის დაზოგვა მოახდინონ, რათა მთლიანობაში სენსორული ქსელის მუშაობის პერიოდი გახანგრძლივდეს. ამ პროტოკოლის მიხედვით მომზადების ფაზაში, სენსორული კვანძების განაწილების შემდეგ ხდება კლასტერის მმართველი კვანძის შერჩევის პროცესი ალბათური მეთოდით. გამომდინარე იქიდან, რომ რეალური გარემო პირობები დინამიურია და შესაძლოა მოხდეს სენსორული ქსელის განლაგების სტრუქტურის ცვლილება, მმართველი კვანძის სელექციის პროცესი ყოველ ჯერზე თავიდან იწყება. ეს პროცესი შემდეგნაირად მიმდინარეობს: თითოეულ სენსორულ კვანძს ევალება შეარჩიოს ალბათური რიცხვი 0-დან 1-მდე შუალედში. იმ შემთხვევაში თუ რომელიმე კვანძის ალბათური რიცხვი ნაკლები იქნება ვიდრე გარკვეული წინასწარ შერჩეული $T(n)$ ზღვარი, მაშინ მას მიეცემა უფლება შერჩეულ იქნას მმართველ კვანძად. $T(n)$ -ის განმარტება მოცემულია 1-ელ ფორმულაში:

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1 - p \times [r \bmod (1/p)]} & \text{თუ } n \in G \\ 0 & \text{სხვა შემთხვევაში} \end{cases} \quad (5.1)$$

სადაც:

P - კლასტერის მმართველი კვანძის შერჩევის პროცენტული მნიშვნელობაა.

R - მიმდინარე პროცესი.

G - იმ სენსორული კვანძების ნაკრები რომლებიც არ ყოფილან მმართველი კვანძები $1/p$ პროცესის განმავლობაში.

მიუხედავად იმისა, რომ LEACH პროტოკოლი ეფექტურად ახდენს ენერჯის კონსერვაციას სენსორულ კვანძებში და კომპრესიას უკეთებს გადასაცემი ინფორმაციული ცხრილის ზომას, მაინც აღნიშნება მუშაობის გარკვეული ხარვეზები და შეზღუდვები, როგორებიცაა[37]:

- არ არის გათვალისწინებული სენსორული კვანძების ენერჯის ნაშთის ათვისება კლასტერის მმართველი კვანძის სელექციის პროცესში.
- როდესაც სენსორული ქსელის განლაგების არეალი იზრდება, მმართველი კვანძი რომელიც ცენტრალური სადგურიდან შორს აღმოჩნდება, კომუნიკაციაზე მუდმივად ზრდად ენერჯო რესურსს ხარჯავს. LEACH პროტოკოლი კი შემუშავებულია მცირე არეალზე განაწილებული სენსორული კვანძების მართვის სცენარისათვის.
- აქვს გარკვეული შეზღუდვები TDMA ცხრილის განრიგის მიხედვით მუშაობას: თითოეულ კლასტერის მმართველ კვანძს ინფორმაციის გადასაცემად თავისი დროის პერიოდი აქვს გაწერილი, მიუხედავად იმისა აქვს გადასაცემი ინფორმაცია თუ არა.
- ზოგიერთ კლასტერში სენსორული კვანძების სიმჭიდროვე მაღალია, რაც გავლენას ახდენს ინფორმაციის გადაცემის სიხშირეზე ცენტრალური სადგურისთვის.
- სენსორული კვანძის მმართველ კვანძად შერჩევის შემდეგ ხდება უშუალოდ ამ კვანძზე შეზღუდვების მოხსნა და კვანძი რიგითი მუშა კვანძიდან მმართველ კვანძად გარდაიქმნება. ეს პროცესი არ არის კარგად ოპტიმიზირებული, ამიტომ მმართველი კვანძი პროცესზე იმაზე მეტ ენერჯიას ხარჯავს, ვიდრე რიგით კვანძად მუშაობის შემთხვევაში.
- LEACH პროტოკოლი არ ახდენს სენსორული კვანძების ენერჯო ეფექტურობის მონიტორინგს და ამიტომ დაშვებას აკეთებს, რომ სენსორულ კვანძებს მუდმივად საკმარისი ენერჯია აქვს მმართველ კვანძამდე კავშირის განსახორციელებლად, აქედან გამომდინარე

რიგით სენსორულ კვანძებს, მით მეტი ენერჯის ხარჯვა უწევთ რაც უფრო შორს არიან მმართველი კვანძისაგან.

- LEACH პროტოკოლი დაშვებას აკეთებს ასევე იმაზე, რომ ქსელში არსებული თითოეული სენსორული კვანძი ჰომოგენურია, რაც ყველა შემთხვევასთან თუ საკვლევ ამოცანასთან სწორი მდგომა არ არის. შესაბამისად ესაჭიროება მეტად დახვეწა, რომ ჰეტეროგენურ ამოცანებსაც მაქსიმალურად მიესადაგოს.

- LEACH არ უზრუნველყოფს მონაცემთა დაცულობასა და საიმედოობას სენსორულ კვანძებს შორის, ამიტომ ესაჭიროება დამატებითი უსაფრთხოების მექანიზმები [1].

5.2 სენსორული ქსელის მოდელის მიმოხილვა

სენსორული კვანძების განაწილების პროცესი უსქ-ის ერთერთ პრიორიტეტულ პრობლემას წარმოადგენს, რადგან იგი დაკავშირებულია მრავალ ფუნქციონალთან, როგორებიცაა კავშირი, უსაფრთხოება და ენერგო-მოხმარება. მმართველი კვანძის სიახლოვეს განლაგებული რიგითი სენსორული კვანძები სხვებთან შედარებით უფრო მეტ ენერჯიას ხარჯავენ, რადგან ეს კვანძები ახდენენ სხვა კვანძებიდან მოსული ინფორმაციის ტრანზიტულ მიღება-გადაცემას. ამ პრობლემის ფორმულირებისათვის, სენსორული კვანძების ლოკაცია და ცენტრალური სადგურის ადგილმდებარეობა განისაზღვრება 2D გაუსის ელიფსური განაწილების ფუნქციით. გაუსის განაწილების საშუალებით მიღწეულია ენერჯის ბალანსი და გაუმჯობესებულია ქსელის სასიცოცხლო დრო, რადგან სტანდარტულ დევიაციის ფაქტორს აქვს მნიშვნელოვანი გავლენა, როგორც ენერჯის მოხმარებაზე ასევე სასიცოცხლო პერიოდზე. თუ კი ჩავთვლით რომ უსქ შედგება N რაოდენობის სენსორული კვანძებისაგან და ცენტრალური სადგურები განაწილებულია ალბათურად $M \times M^2$ არეალისთვის. გაუსის განაწილება მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$f(a, b) = \frac{1}{2\pi\sigma_a\sigma_b} \exp - \left(\frac{(a - a_0)^2}{2\sigma_a^2} + \frac{(b - b_0)^2}{2\sigma_b^2} \right) \quad (5.2)$$

სადაც:

- (a_0, b_0) : აღნიშნავს, თითოეულის კვანძის განლაგების პოზიციას.
- σ_a და σ_b : წარმოადგენს a და b განზომილების სტანდარტულ დევიაციას.

სენსორული კვანძების განლაგების შემდეგ თითოეულს აქვს თავისი უნიკალური ID მისამართი და მისთვის განსაზღვრული ენერგო რესურსი. სენსორული კვანძების ენერგო რეზერვები თავდაპირველად ყველა კვანძისათვის ერთი და იგივეა და გამომდინარე იქიდან, რომ სენსორული კვანძის ელემენტი გადამუხტვას არ ექვემდებარება მისი სრულად მოხმარების შემდეგ კვანძი წვეტს ფუნქციონირებას [2].

5.3 შერჩეული მიდგომა

LEACH პროტოკოლის უარყოფითი მხარეები შესაძლებელია დაიყოს სამ ფუნდამენტურ პრობლემად. პირველი პრობლემა დაკავშირებულია კლასტერის მმართველი კვანძის არასწორ შერჩევასთან. მეორე პრობლემა წარმოქმნილია სენსორულ ქსელში კვანძების არათანაბარ განაწილებასთან. ენერგო მოხმარება პატარა კლასტერებს უფრო დიდი აქვს ვიდრე დიდებს, რადგან ინფორმაციის გადასაცემად პლატარა კლასტერის კვანძები უფრო აქტიურად მუშაობენ ვიდრე დიდის.

მესამე პრობლემა ფორმულირებულ იქნა სენსორული ქსელის მზადყოფნის ფაზის დროს. ამ ფაზის დროს LEACH პროტოკოლზე მომუშავე კვანძები მუდმივ რეჟიმში ახდენენ ინფორმაციის გადაცემას, მაშინაც კი როდესაც გადასაცემი არაფერი აქვთ. ეს სამი ფუნდამენტური პრობლემა იწვევს ენერგეტიკული რესურსის არაეფექტურ გამოყენებას. რაც საბოლოოდ ქსელის სასიცოცხლო ციკლს ამცირებს.

„შერჩეული მიდგომა“ გვთავაზობს LEACH პროტოკოლის მიერ წარმოქმნილი პრობლემების გადაჭრის ორ მეთოდს. ორივე მეთოდის ამოცანას წარმოადგენს შემთხვევითად მიმოვანტული სენსორული კვანძების

ენერგო რესურსის შემცირება საჭირო მინიმუმამდე. ხოლო კლასტერის მმართველი კვანძის შერჩევის მეთოდი უმჯობესდება შერჩევის დროის საჭირო ზღვრის $T(n)$ მანიპულირების საშუალებით. დამატებით, თითოეული სენსორული კვანძი ინფორმაციის გადაცემას მოახდენს მხოლოდ მისთვის სპეციალურად გამოყოფილ დროითი სლოტის განმავლობაში, რადგან, როგორც დავინახეთ, არაპრაქტიკულია სენსორულმა კვანძმა ინფორმაციის გადაცემა მუდმივ რეჟიმში მოახდინოს. მეტიც, შესასრულებელი ამოცანიდან გამომდინარე სენსორული კვანძების უთანასწორო მუშაობა, რაც იწვევს ენერჯის არაბალანსირებულ გამოყენებას გადაჭრილ იქნა მოდიფიცირებული TDMA განრიგების მიხედვით, რაც ასევე აუმჯობესებს გადაცემის მექანიზმს [38].

5.4 კლასტერის მმართველი კვანძის შერჩევის მოდიფიცირებული მეთოდი

კლასტერის მმართველი კვანძები წარმოადგენენ სტანდარტულ სენსორულ კვანძებს შეცვლილი ფუნქციონალით, რომელთა სელექციაც ხორციელდება უსქ-ში. მაშინ როდესაც სენსორული მოწყობილობები განაწილდებიან გარკვეულ გეოგრაფულ არეალზე, პირველ ეტაპზე მიმდინარეობს მმართველი კვანძის შერჩევის პროცესი. მოდიფიცირებულ - LEACH პროტოკოლში გათვალისწინებულია ის ტექნიკური პროცესები რომლებიც არ იყო გათვალისწინებული LEACH-ში. ეს გულისხმობს სენსორული კვანძის ენერჯის ნაშთის მართვას, რათა რამოდენიმეჯერ იყოს შესაძლებელი ერთი და იგივე სენსორული კვანძის მმართველ კვანძად არჩევის პროცესი. ასევე გათვალისწინებულია მანძილი მმართველ კვანძსა და ცენტრალურ სადგურს შორის, მეზობელი კვანძების რაოდენობა, განლაგება და მათი ენერგეტიკული რესურსი. მეზობელი კვანძების განლაგებისა და ამოცნობის პროცესი მიდინარეობს მმართველი კვანძის შერჩევის პროცესის პარალელურად.

ახალი პროტოკოლის მიხედვით კვანძს რომელსაც სხვასთან შედარებით მეტი მეზობელი ჰყავს მმართველ კვანძად ამორჩევის მაღალი შანსი აქვს [4].

სხვა ფაქტორი, რასაც ქსელის სასიცოცხლო დროის გახანგრძლივება შეუძლია, არის სენსორული კვანძების ნარჩენი ენერჯის რეზერვი. $T(n)$ - ზღვარი მრავლდება ნარჩენი ენერჯის ფაქტორზე, როგორც (3) გამოსახულებაშია.

$$T(n)_1 = \begin{cases} T(n) \times \frac{E_{re}}{E_{in}} & \text{თუ } n \in GT(n) \times \frac{E_{re}}{E_{in}} \\ 0 & \text{სხვა შემთხვევაში} \end{cases} \quad (5.3)$$

აქ:

- E_{re} - მიმდინარე მომენტისათვის სენსორული კვანძის ნარჩენი ენერჯის რაოდენობაა.
- E_{in} - არის სენსორული კვანძის თავდაპირველი ენერჯის რაოდენობაა.

სენსორული კვანძს, რომელსაც ნარჩენი ენერჯია სხვასთან შედარებით მაღალი ექნება, მმართველ კვანძად სელექციის უფრო მაღალი შანსი აქვს.

მანძილი არის შემდეგი ფაქტორი რომელიც გავლენას ახდენს მმართველი კვანძის ენერჯის ზღვრის განსაზღვრაზე. კერძოდ, რაც მეტია მანძილი სენსორულ კვანძს და ცენტრალურ სადგურს შორის მით მეტი ენერჯია მოიხმარება კომუნიკაციის დასამყარებლად. სწორედ ამიტომ არა ბიუჯეტურია მმართველ კვანძად ისეთი სენსორის შერჩევა, რომელიც ცენტრალური სადგურისგან შორს არის განთავსებული.

შედეგად გარანტირებულია ინფორმაციის გადაცემა ცენტრალურ სადგურამდე მანამ სანამ ერთი კვანძი მაინც იქნება მუშა მდგომარეობაში. ამასთან გასათვალისწინებელია, რომ რაც მეტია მანძილი ცენტრალური სადგურიდან ალბათობა კვანძის მმართველ კვანძად არჩევისთვის ნაკლებია [39].

სიმულაცია გვიჩვენებს, რომ მმართველი კვანძის სელექციის ამ ტიპის მოდიფიკაციამ LEACH პროტოკოლის შემთხვევაში შესაძლებელია ქსელის სიცოცხლისუნარიანობა გაზარდოს 15% - ით.

5.5 მოდიფიცირებული TDMA განრიგები

მოდიფიკაცია საშუალებას გვაძლევს LEACH პროტოკოლში აღნიშნული ნაკლოვანებები ნაწილობრივ აღმოიფხვრას გადაცემისთვის გამოსაყენებელი ენერჯის ინტერვალების შემცირების საშუალებით. მას შემდეგ რაც მმართველი კვანძის შერჩევის პროცესი დასრულდება ამის შესახებ შეტყობინება ეგზავნება თითოეულ რიგით კვანძს. გადაცემული სიგნალის სიმძლავრიდან გამომდინარე რიგითი სენსორული კვანძი უბრუნებს პასუხს მმართველს მის კლასტერში გასაწევრიანებლად. აქედან გამომდინარე ყველა კლასტერმა იცის მის მიერ დაქვემდებარებული კვანძების რიცხვი. აღსანიშნავია, რომ თითოეული კლასტერისთვის მასში გაწევრიანებული კვანძების რიცხვი შეიძლება ვარიირებადი იყოს. მზადყოფნის ფაზაში მუშაობა დაყოფილია დროით ინტერვალებად და თითოეული კვანძი გადასცემს ინფორმაციას მმართველს მისთვის გამოყოფილ დროით-სლოტში. მზადყოფნის ფაზის მუშაობის დროის ინტერვალს ბევრად აღემატება მომზადების ფაზის დროის ინტერვალს. გარკვეული პერიოდის შემდეგ პროცესი თავიდან იწყება სხვა კვანძისათვის მომზადების ფაზიდან მზადყოფნის ფაზამდე. ახალ რაუნდში ახალი კლასტერის მმართველი კვანძისა და ახალი კლასტერის ფორმირება ხდება. აქედან გამომდინარე ქსელის სასიცოცხლო დროის გამოთვლაც შესაძლებელია შესასრულებელი რაუნდების დაჯამების გზით [40].

TDMA პრობლემა რომ გადაჭრილიყო მოდიფიცირებული TDMA განრიგები შედგენილია ოთხ-ეტაპიანი პროცედურით:

ეტაპი 1 - თითოეული კლასტერის მმართველი კვანძი აკეთებს რიგითი კვანძების აღრიცხვას კლასტერში გაწევრიანებაზე მიღებული მოთხოვნების მიხედვით.

ეტაპი 2 - კლასტერის მმართველი კვანძი უსქ-ში აგზავნის ინფორმაციას მისი კლასტერის (თავისი თავის ჩათვლით) შესახებ. აქედან გამომდინარე ყველა კლასტერს აქვს ინფორმაცია სხვა დანარჩენი კლასტერების შესახებ.

ეტაპი 3 - ყველა დანარჩენი კლასტერისათვის TDMA განრიგის ცხრილები დგინდება ყველაზე დიდი კლასტერის ანალოგიურად.

ეტაპი 4 - მზადყოფის ფაზაში მოდიფიცირებული TDMA ცხრილებით სარგებლობა შეუძლია თითოეულ სენსორულ კვანძს. აქედან გამომდინარე მმართველი კვანძისათვის გადასაცემი ინფორმაცია ერთი და იგივე იქნება ყველა სენსორული კლასტერის შემთხვევაში. მმართველი კვანძისათვის ინფორმაციის მიწოდების შემდეგ რიგითი კვანძები გადადიან ძილის რეჟიმში. ამ დროს რიგითი სენსორული კვანძები ასევე უგულებელყოფენ ისეთ ფუნქციებს, როგორცაა მოცდის რეჟიმში გადასვლა, რათა მიაღწიონ ენერჯის დაზოგვის მაქსიმიზაციას.

საბოლოო ჯამში მივიღეთ, რომ არც ერთი სენსორული კვანძი სხვაზე მეტად არ ახდენს ინფორმაციის გადაცემას. ეს გაუმჯობესება საშუალებას იძლევა მოიხსნას სენსორულ კვანძებს შორის უთანასწორობის პრობლემა. ამასთან იგი ასევე იცავს კვანძს დამატებითი ენერჯო დანახარჯებისგან.

თავი 5_ის შედეგები

განხილულია უსქ-ში გამოყენებული გადაცემის LEACH პროტოკოლი, მისი განსხვავებული ვარიანტები და შედგენილია მისი გაუმჯობესებული ვარიანტი. ამისათვის გადაჭრილია ორი ამოცანა: პირველი - სწორი და ოპტიმალური კლასტერის მმართველი კვანძის შერჩევა, რაც მიღწეულია კლასტერის შერჩევის ზღვრის მოდიფიცირებით. მეორე, მოდიფიცირებულია პროტოკოლი ქსელში კვანძთაშორისი თანასწორობის მისაღწევად, რის შედეგადაც ქსელის თითოეული კვანძი თანაბარი ოპტიმალური დატვირთვით იმუშავებს. ასევე, მოდიფიცირება გაუკეთდა TDMA განრიგების ცხრილს და განზოგადდა იგი თითოეული სენსორული კვანძისათვის, რაც უზრუნველყოფს კვანძთაშორის თანასწორობას. ამ მეთოდების გაუმჯობესებით მიღწეულია უსქ-ში ენერჯო რესურსის ოპტიმალური გადანაწილება. საბოლოოდ დადგენილია, რომ LEACH

პროტოკოლის გაუმჯობესებული ვარიანტის გამოყენება მნიშვნელოვნად ზრდის უსქ-ის მუშაობის დროს.

თავი 6. ექსპერიმენტული სამუშაო

6.1 Arduino Uno-ზე ენერგო მოხმარების შემცირება

Arduino Uno-ზე ხდება ენერგიის რესურდების არა ეფექტური განაწილება როდესაც მისი ენერგიის წყაროს წარმოადგენს ელემენტი [41].



ნახ 48. Arduino Uno-ს სამუშაო ძირითადი პლატა

ამ შემთხვევაში თითოეული არასწორად გამოყენებული მილიამპერი მუშაობის ხანგრძლივობის შემცირებას იწვევს. სწორედ ამიტომ Arduino Uno-ზე ენერო რესურსები უფრო ეფექტურად უნდა გამოვიყენოთ.

Arduino Uno თავდაპირველად შემუშავებულ იქნა როგორც დეველოპმენტური პლატა [42], მასში არ მომხდარა დაბალი ენერგო მოხმარების სქემების ინტეგრაცია, რაც იმას ნიშნავს, რომ მისი ენერგიის მოხმარება იმაზე მეტია ვიდრე დასაშვები მინიმუმით არის განსაზღვრული. ნაკლები ენერგიის მოხმარებისთვის შესაძლებელია შემდეგი აპარატურული და პროგრამული ცვლილებების შეტანა Arduino Uno-ს პლატაში:

- შეიცვალოს წრფივი რეგულატორი DC-DC კონვერტორით;
- დარეგულირდეს USB-სერიული პორტი, მხოლოდ UBS პორტიდან კვების მიღებაზე;
- ცენტრალურ პლატაზე ჩაიხსნას ან დაპაიკდეს მუდმივად ჩართული LED ნათურები;
- გააქტიურდეს პროცესორის ძილის რეჟიმი.

პლატაზე ცვლილებების შეტანის შემდეგ, კომპონენტების შერჩევადი ცვლილებისა და მიკრო-კონტროლერის ძილის რეჟიმის გააქტიურების

შემთხვევაში Arduino Uno-ზე ენერგო მოხმარება მოგვცემს დაახლოებით 95% ეფექტურობას ძირითად მოხმარებასთან შედარებით.

ცხრილი 24. Arduino Uno დენის მოხმარება LED ჩართულ/გამორთულ მდგომარეობაში

ჩართული LED	გამორთული LED
55mA	53mA

6.2 ძაბვის რეგულატორი

საბაზისო Arduino Uno-ს პლატაზე უდიდესი ენერგეტიკული დანაკარგები მოდის ძაბვის რეგულატორზე, რომელიც ბლოკავს და სითბოში გარდაქმნის მასში შემავალი ძაბვის დიდ ნაწილს. პლატა იყენებს წრფივ რეგულატორს, რომელიც სითბურ ენერგიად გარდაქმნის საჭირო ზღვარზე მეტ ენერგიას. მაშინ როდესაც შესასვლელზე მიეწოდება 12ვ, ხოლო გამოსასვლელზე ვიღებთ 5ვ-ს, ამ შემთხვევაში იკარგება ენერგიის დაახლოებით 58%, რომლის ნაწილი გარდაიქმნება სითბოში და ნაწილს უშუალოდ რეგულატორი იყენებს.

რეგულატორის შეცვლა კვების უფრო ეფექტური გამტარით - როგორც არის მაგალითად DC-DC კონვერტერით, მოგვცემს ენერგეტიკული რესურსის ეფექტურ გამოყენებას მაქსიმუმ 92%-ნი ეფექტურობით (დამოკიდებულია გამოყენების სპეციფიკაციაზე).



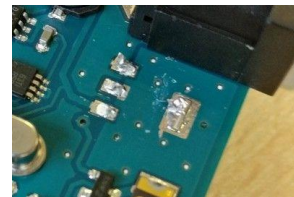
**ნახ 49. ქარხნული NCP1117ST50T3G
5ვ@1ა ძაბვის წრფივი
რეგულატორი**

სამწუხაროდ პლატაზე არ არის pin კონტაქტები რომლებიც მოერგება SOT-22-ის განლაგებას, როგორც Arduino Uno-ს, NCP1117 წრფივი რეგულატორის შემთხვევაშია [43]; პლატაზე არის ასეთი pin კონტაქტების არასტანდარტული განთავსება (1. დამიწება, 2. გამომავალი, 3. შემავალი). თუმცა, DC-DC კონექტორი შეიძლება გადაეწყოს არსებულ pin კონტაქტებს რომ მოერგოს.

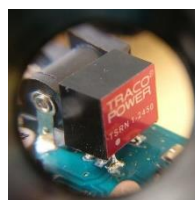
Traco TSRN-1-2450 წარმოადგენს 5ვ კომუტირებად რეგულატორს ჩაშენებული კონდენსატორებით. ეს მოწყობილობა შეიძლება ჩაენაცვლოს არსებულ 78xx სერიის წრფივი რეგულატორის pin კონტაქტებს, ყოველგვარი გარე მოწყობილობის დამატების გარეშე. კომუტირებადი რეგულატორის ეფექტურობა წრფივსთან შედარებით შეადგენს დაახლოებით 83% გადაცემული სიმძლავრიდან.



ნახ 50. პლატაზე არსებულ pin კონტაქტებთან მოსარგებლად DC-DC კონვერტორზე გადაღუნულია გამოსასვლელები



ნახ 51. სარჩილავით დამუშავებული პლატაზე არსებული pin კონტაქტები



ნახ 52. Traco TSRN-1 კომუტირებადი რეგულატორის განთავსება პლატაზე

მიუხედავად იმისა, რომ Traco TSRN-1 არ წარმოადგენს პინ კონტაქტებთან თავსებად ჩანაცვლებას, შესაძლებელია მისი მოერგება NCP1117-ის ადგილზე გამოსასვლელების გადაღუნვითა და სარჩილავის საშუალებით [44].

რეგულატორის ჩანაცვლების შემდეგ ენერჯის მოხმარება მცირდება 48%-მდე. თუმცაღა შემცირების პროცესი ცვლადია, რამეთუ რეგულატორის ეფექტურობაც ცვლადია, რომელიც დამოკიდებულია მიწოდებული დენის მნიშვნელობაზე.

6.3 ძაბვის წრფივი რეგულატორის გაუქმება

ძაბვის წრფივი რეგულატორი წარმოადგენს ძაბვის რეგულირების ბიუჯეტურ მოწყობილობას, რომელსაც შეუძლია მაღალი ძაბვა დაწიოს მხოლოდ 3 pin კონტაქტის საშუალებით (V_{in} , მიწა, V_{out}). თუმცა წრფივი რეგულატორის უარყოფით მხარეს წარმოადგენს ის, რომ ისინი ძალიან ცხელდებიან როდესაც შემსვლელ-გამომსვლელ ძაბვებს შორის დიდი სხვაობაა, ან მაღალი დენის შემთხვევაში. შესაძლებელია თბურ ენერჯიად გარდაქმნილი სიმძლავრის გამოთვლა შემდეგი განტოლების საშუალებით:

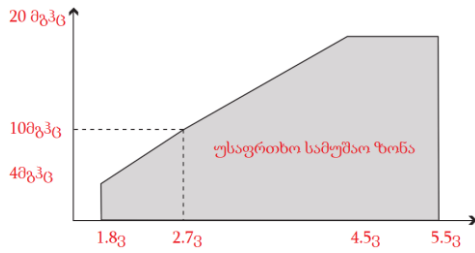
$$P_{დანახარჯებზე} = (V_{in} - V_{out}) \times I \quad (6.1)$$

ძაბვის წრფივ რეგულატორზე შემავალი დენის მნიშვნელობა უტოლდება გამომავალი დენის მნიშვნელობას. წრფივი რეგულატორი თავის პოტენციალს მაქსიმუმ 70%-ნი ეფექტურობით იყენებს. რაც მაღალია მასში გამავალი დენი მით ნაკლებია ეფექტურობა.

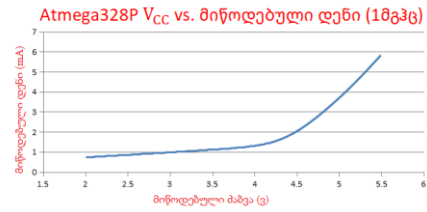
ამოტომ კომპუტირებადი რეგულატორები უფრო მაღალ ეფექტურობას გვიჩვენებენ რადგან შემავალი და გამომავალი დენი ერთი და იგივე არ არის. მცირე დატვირთვის შემთხვევაშიც კი შეგიძლიათ შეამჩნიოთ კომპუტირებადი რეგულატორის ეფექტურობა, რაც 90%-ზე მაღალია. კომპუტირებად რეგულატორზე შესაძლებელია როგორც შემავალი ძაბვის შემირება ასევე მისი გაზრდა.

6.4 ძაბვის შემცირება

დენის შემცირების ერთ-ერთი მარტივი გზაა Arduino-ს პლატისთვის დაბალი ძაბვის მიწოდება. ძაბვის შემცირება 5ვ-დან 3.3ვ-მდე, დენის გამოყენება ეცემა $\sim 4mA$ -დან, $\sim 1mA$ -მდე.



ნახ. 53. მაქსიმალური სიხშირე vs. V_{CC}



ნახ. 54. Atmega328P V_{CC} vs. მიწოდებული დენი (1მგჰც)

თუმცა გასათვალისწინებელია ძაბვის შემცირების გვერდითი ეფექტიც. ძაბვის ბევრად შემცირება, პროცესორზე ტაქტური სიხშირის სისწაფის შეუმცირებლად, იწვევს მიკროკონტროლერის უცნაურ ფუნქციონირებას. შესწავლილი გამოთვლების საშუალებით დადგენილია, რომ 3.3ვ ძაბვაზე, რეკომენდირებული მაქსიმალური სიხშირე არის დაახლოებით 13მგჰც, ხოლო ოპტიმალური დაახლოებით 8მგჰც.

ნახ. 53 მოცემულია თუ როგორ შეიძლება ძაბვის შემცირებით Arduino-ზე მოხმარებული სიმძლავრის მნიშვნელოვანი შემცირება. ნახ. 54 ნაჩვენებია პროგრამირების თანმდევი პროცესი 1მგჰც სიხშირეზე.

6.5 USB-სერიული კონვერტორი

ძირითად ATmega328 მიკროკონტროლერთან ერთად Arduino Uno-ს პლატაზე განთავსებულია USB-სერიულზე კონვერტორის ჩიპი, ATmega16U2. ეს ჩიპი წარმოადგენს ზოგადი გამოყენების მიკროკონტროლერს, პლატაზე USB კონექტორის კონტროლის შესაძლებლობით.

მიუხედავად იმისა, რომ ჩიპის გამოყენება შესაძლებელია როგორც USB-სერიული კონვერტორი (UART), ენერჯის დაზოგვის არანაირი მექანიზმი არ არის ჩანერგილი ჩიპში, რაც იმას ნიშნავს, რომ ჩიპის ენერჯის მოხმარება რჩება უცვლელი მაშინაც კი როდესაც არ გამოიყენება. თუ კი შესაძლებელი გახდება ჩიპის გამორთვა მაშინ როდესაც ის არ გამოიყენება, ეს მნიშვნელოვნად დაზოგავს ცენტრალურ პლატაზე მოსულ დატვირთვას.

ამ ნაშრომში არ განვიხილავთ ჩიპის გადაპროგრამებას ახალი პროგრამული უზრუნველყოფის საშუალებით (Firmware), რადგან ეს მეთოდი მოითხოვს ICSP პროგრამისტს და ამავდროილად ამის განხორციელება არც ისე მარტივია, როგორც არდუინოში ახალი ბრძანებების ატვირთვა Arduino IDE პროგრამის საშუალებით. სწორედ ამიტომ მხოლოდ მექანიკურ ცვლილებებს განვახორციელებთ.

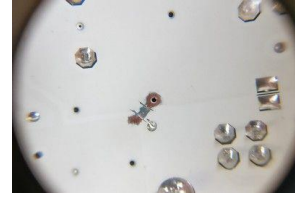
როგორც მთავარი სამუშაო პლატა, ასევე UART ჩიპიც იკვებება რეგულირებადი 5ვ ძაბვით, ამიტომ ის კვებას იღებს USB პორტიდან როდესაც მხოლოდ USB კვებაა აქტიური, ან რეგულირებადი DC კვებიდან. MOSFET-ის კომპარატორი წარმოადგენს იდეალურ დიოდურ კომუტატორს, კვების მხოლოდ ერთი წყაროს შესარჩევად.

Arduino Uno-ს სქემიდან გამომდინარე, ATmega16U2 იკვებება 32&4 pin კონტაქტების საშუალებით და ხაზიდან მიეწოდება რექტიფიცირებული 5ვ ძაბვა. გამომდინარე იქიდან, რომ ეს ხაზი ფიზიკურად ახლოს არის USBV_{cc} bus კონექტორთან, შესაძლებელია ჩაიჭრას პლატაზე არსებული ტრასები რომლებიც მიემართება 32&4 pin კონტაქტებზე გადაერთდეს USBV_{cc} კონექტორზე ისე, რომ ჩიპს ძაბვა მიეწოდოს მხოლოდ USB კონექტორზე ძაბვის მიწოდების შემთხვევაში. ანგარიშგასაწევია ის ფაქტიც, რომ ჩიპისთვის ძაბის ამ გზით მიწოდება არ არის რეკომენდირებული, რადგან USB-ზე ძაბვის მიწოდების უნდა იყოს 5ვ±0,2ვ, არ უნდა იყოს დიდი განსხვავება მიწოდებულ და სასიგნალო ძაბვებს შორის ჩიპი რომ არ დაზიანდეს.

ამისათვის პირველ რიგში უნდა ჩაიჭრას 5 ვოლტიანი კვება პლატის ქვედა ნაწილზე, რაც აწვდის 5ვ ძაბვას 16U2-ს (pin 32). ჩიპი განთავსებულია 32 პინის ნაკრებში, სადაც pin კონტაქტები დანომრილია საათის ისრის საწინააღმდეგოდ პლატის ძირის ზედა მარცხენა მხარეს, მინიშნებულია ასევე ზედა მხარეს წერტილის საშუალებით. ტრასის განცალკევება განხორციელდა, ისე რომ კონდენსატორი 32 pin-სა და დამიწებას შორის არ განცალკევებულა 32 pin კონტაქტისაგან.



ნახ 55. პლატაზე არსებული 32 პინის გამონათავისუფლება გარდა C7 კონტაქტისა



ნახ 56. ტრასის გაუქმება, გადაჭრით და ცენტრში არსებული ნივთიერების მოშორება

მე-4 pin კონტაქტსაც ესაჭიროება განცალკევება 5ვ ხაზისაგან, რაც შეიძლება გაკეთდეს პლატის ზედა ფენაზე. ამავე დროს, 32 pin კონტაქტსა და 31 pin კონტაქტს შორის უნდა იყოს თავისუფალი, ისე რომ 4&32 კონტაქტებმა USBV_{CC} ხაზს დაუკავშირდეს 31 კონტაქტის საშუალებით.



ნახ. 57. 4, 31&32 pin კონტაქტებს შორის გახსნილი ტრასა

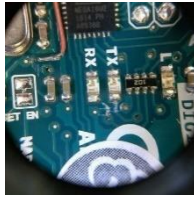


ნახ. 58. pin4 ტრასის გადახსნა ლოკალური კონდენსატორის გათიშვის გარეშე



ნახ. 59. 13მმ სიგრძის მყარ გამტარიანი სადენი, თავში და ბოლოში 2მმ გაფრცქვნიტ და მიერთებული მხოლოდ USB კვებაზე.

მე-4 და 32 pin კონტაქტები შესაძლებელია უკან დაუკავშირდეს 31 კონტაქტს „ჯამპერ“ კაბელის საშუალებით. ჩვენს შემთხვევაში გამოყენებულია 30AWG მყარ გამტარიანი კაბელი, 13მმ სიგრძითა და თავში და ბოლოში 2მმ გაფრცქვნიტ, კაბელი მოხრილია 90° კუთხით ორივე მხარეს და სარჩილავით დამაგრებულია 3 წერტილზე.



ნახ 60. RX და TX დიოდებზე ძაბვის გაუქმება

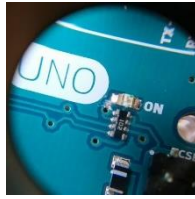
აქ ასევე გასათვალისწინებელია ის ფაქტი რომ მხოლოდ ენერჯის წყაროს შეცვლა ჩიპს სრულად არ ანთავისუფლებს დატვირთვისაგან. რადგან RX და TX LED ნათურები დაკავშირებულია ცენტრალური მოწოდების 5 ვოლტიან კვებასთან ATmega16U2-ის გავლით, მიკროკონტროლერზე ენერჯის მიწოდების გაუქმება ნიშნევს რომ LED დიოდები ყოველთვის ანთებულ მდგომარეობაში დარჩეს. ზედმეტი ენერგეტიკული დანახარჯების თავიდან ასარიდებლად ან LED ნათურების ტრასა გადავჭრათ ან სარჩილავით გადავხსნათ ხაზი.

UART კონვერტორი კვებას იღებდეს მხოლოდ USB კონექტორიდან. ამრიგად, პლატა ენერჯიას იყენებს მხოლოდ მაშინ, როდესაც მისი პროგრამირების პროცესი ხორციელდება, რაც იწვევს ენერჯიის გამოყენების შემცირებას 44,7%. ეს ცვლილება პლატის პროგრამირებას არ ცვლის; როდესაც კომპიუტერი მიერთებულია USB პორტით, ჩიპს კვება მიეწოდება მხოლოდ კომპიუტერიდან და ძირითადი ATmega328 მიკროკონტროლერი დაპროგრამდეს სტანდარტულად Arduino IDE პროგრამის საშუალებით.

ცხრილი 25. ATmega16U2 UART კონვერტორზე კვების შეწყვეტის პროცესი

სტატუსი	LED ჩართული	LED გამორთული
ძირითადი UNO	55mA	53mA
USB, UART	31.5mA	29.2mA

6.6 LED ინდიკატორების გაუქმება



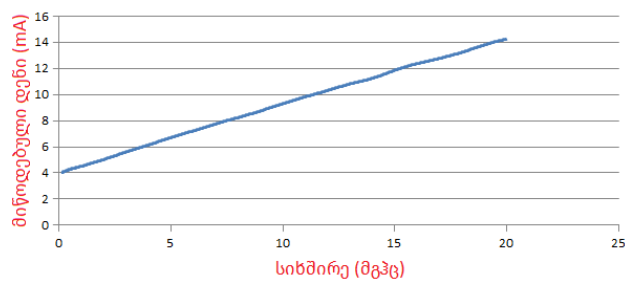
ნახ 61. RX და TX დიოდებზე ძაბვის გაუქმება

რადგან Arduino Uno თავდაპირველად შემუშავებულ იქნა როგორც დეველოპმენტური პლატა, მასზე კვების მიწოდებას გვიჩვენებს LED ინდიკატორი. დაბალი ენერგო მოხმარებასთან მოსარგებლად, ზედმეტი დანაკარგები არ გვესაჭიროება, ამისათვის LED ნათურების ტრასა გადავჭრათ ან სარჩილავით გადავხსნათ კავშირის ხაზი.

ცხრილი 26. კვების LED ინდიკატორის გათიშვა გვაძლევს დენის მოგებას 7mA.

სტატუსი	LED ჩართული	LED გამორთული
ძირითადი UNO	55mA	53mA
გამორთული LED	48mA	46mA

6.6 მიკროპროცესორზე ტაქტური სიხარის შემცირება



ნახ. 62. Atmega328P სიხშირე vs. მიწოდებული დენი (mA)

პროექტებში სადაც Arduinos არ ესაჭიროება დიდი რაოდენობის ინსტრუქციების შერულება დროის მცირე მონაკვეთში ან თუ კი სიჩქარე დაბრკოლებას არ წარმოადგენს, პროცესორის ტაქტური სიხარის შემცირება

რამოდენიმე მილიამპერის დაზოგვის საშუალებას მოგვცემს. მაგალითად, Arduino-ზე რომელიც მუშაობს 5 ვოლტ ძაბვაზე ტაქტური სიჩქარის შემცირება 16მგჰც-დან 8მგჰც-მდე, შეუძლია გამოიწვიოს დენის მოხმარების შემცირება 12mA-დან ~8.5mA-მდე.

ნახ. 62 ნაჩვენებია მიკროკონტროლერზე ტაქტური სიჩქარის ზეგავლენა.

როგორც ნახაზიდან ჩანს ტაქტური სიჩქარის შემცირება ელემენტის „სიცოცხლის“ ციკლს დაახლოებით ასამმაგებს. ამას უარყოფითი მხარეებიც აქვს, როგორც არის შენელებული გამოთვლითი/სამუშაო პროცესი.

6.7 ენერჯის შენახვის პროცესი პროგრამული ჩარევის გზით

აქამდე განიხილებოდა თუ როგორ ხდებოდა Arduino-ზე ენერჯის გამოყენების შემცირება, მაგრამ ჩვენ არ შევხებივართ იმას, თუ რისთვის იყენებს ეს მოწყობილობა ამ ენერჯიას. ATmega328P-ში მოთავსებულია წრედების მიმდევრობები რომლებიც გამოთვლით პროცესორთან ერთად სინქრონულად მუშაობენ მასზე დატვირთვის შესამცირებლად, მუშაობისთვის ეს წრედები ასევე იყენებენ ენერჯის გარკვეულ რაოდენობას. Arduino-ს `analogWrite()` ფუნქციას, არ ესაჭიროება პროცესორის მიერ PWM სიგნალის შექმნას, ტაქტური ციკლების დასათვლელად. სანაცვლოდ, Arduino იყენებს ერთ-ერთ ინტეგრირებულ ტაიმერს ტაქტური ციკლის დასათვლელად, რომ საჭიროების შემთხვევაში პროცესორზე მუშაობის შეწყვეტის სიგნალი გააგზავნოს. ამ სახის განტვირთვითი ქმედებებით პროცესორს შეუძლია რამოდენიმე საქმის ერთდროულად შესრულება. ATmega328P-ში გვხვდება წრედების მიმდევრობები როგორცაა:

- 3 ტაიმერი;
- „Watchdog“ ტაიმერი;
- Brown-out-ის დეტექტორი;
- ანალოგურ-ციფრული გარდამქმნელი.

თითოეულ ამ დამოუკიდებელ კომპონენტს ესაჭიროება ენერჯია ფუნქციონირებისათვის, თუ ისინი „ხელით“ არ გაუქმდებიან, გააგრძელებენ

ენერჯის მოხმარებას. Brown-out-ის დეტექცია აქტიურ მონიტორინგს უწევს პლატაზე ძაბვის მიმოცვლას, რომ საჭირო ზღვარზე ქვემოთ არ ჩამოვიდეს. თუ ძაბვა ზღვარს ქვემოთ ჩამოვა კონტროლერი გაითიშება და არ ჩაერთვება მანამ სანამ კვების ზღვრული ნორმა არ აღსდგება. ანალოგურ-ციფრული გარდამქმნელი (ADC) ასრულებს ზუსტად იმ ფუნქციას რასაც დასახელება გვკარნახობს, ანალოგურ ძაბვას (რაც შესაძლებელია იყოს 0 ვოლტიდან V_{CC} -მდე) გარდაქმნის ციფრულ ძაბვაში რასაც შემდგომ მიკრო კონტროლერი გამოიყენებს (0-1023 ერთეულამდე, 10-ბიტის კონვერტაციებით). თუ ADC საჭიროებას არ წარმოადგენს, მისი გაუქმება ენერჯის მნიშვნელოვანი დანაზოგი იქნება.

ენერჯის დასაზოგად გამოიყენება Arduino-ს შემდეგი ბიბლიოთეკა -

<https://github.com/roocketscream/Low-Power/archive/master.zip> [45]

შეგვიძლია ასევე გამოვიყენოთ Arduino-ს გაწერილი ბრძანებების ბიბლიოთეკა, რაც საშუალებას მოგვცემს გადავიყვანოთ Arduino ძილის რეჟიმში რამოდენიმე მწმ_დან, უსასრულო დროით. ეს ბიბლიოთეკა ასევე საშუალებას გვაძლევს დედაპლატის ცალკეული ნაწილები გაუქმდეს.

Arduino-ს შემდეგი სკეჩი საშუალებას მოგვცემს დავინახოთ რუ რამდენად მცირე ენერჯია ესაჭიროება მოწყობილობას ძილის რეჟიმში. პლატის თავდაპირველი სამუშაო რეჟიმია 5 ვოლტი, 16მგჰც.

```
#include "LowPower.h"

void setup()
{
  pinMode(13,OUTPUT);
}

void loop()
{
  digitalWrite(13,HIGH);
  delay(2000);
  digitalWrite(13,LOW);
  LowPower.powerDown(SLEEP_2S, ADC_OFF, BOD_OFF);
}
```


ამ სკეჩის მიხედვით Arduino მუშა რეჟიმიდან (LED მუშაობენ), გადადის ძილის რეჟიმში 2 წამის განმავლობაში, ამავე დროს ასევე მუშაობას წყვეტს ანალოდურ-ციფრული გარდამქმნელი (ADC) და Brown-out დეტექტორი (BOD). ძილის პროცესში Arduino-ს ენერგო მოხმარება მცირდება 14mA-დან სულ რაღაც 6μA-მდე. ხოლო იმ შემთხვევაში თუ კი ზემოხსენიებულ რამოდენიმე მეთოდსაც გამოვიყენებთ ენერგიის შესამცირებლად მივიღებთ შემდეგ ცხრილს:

ცხრილი 27. Arduino-ს მოხმარებული ენერგიის შემცირებით მიღებული შედეგი

V_{CC} (V)	ტქატური სიჩქარე (მგჰც)	გაღვიძების დენი (mA)	ძილის დენი (μ A)
5.0	16	13.92	6.2
5.0	8	9.03	6.2
3.0	16	6.48	4.3
3.0	8	3.87	4.3

ცხრ. 27 მიხედვით შესაძლოა გაურკვეველია თუ რატომ არ ეცემა ტაქტური სიხშირე, რადგან პროცესორი უნდა ითიშებოდეს ძილის რეჟიმში. ეს იმიტომ, რომ მოწყობილობა მუდმივად ძილის რეჟიმში არ დარჩეს და მასზე გარკვეული კონტროლი ისევ შენარჩუნდეს. ყოველივე ზემოთ ნათქვამის გათვალისწინებით, შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ თუ კი მოწყობილობა ძილის რეჟიმში გადავა დროის 50% მაინც მისი სამუშაო ხანგრძლივობა გაიზრდება დაახლოებით 7-ჯერ.

Arduino UNO_ს პლატის მოდიფიცირებით ძაბვის რეგულატორის ჩანაცვლებით რაც წარმოადგენს გეომეტრიულ ცვლილებას, გამომდინარე იქიდან, რომ ძაბვის კონვერტაციის ცვალებადობა იზრდება, ასევე გასათვალისწინებელია, რომ ამ სახის ცვლილება არა-წრფივია. საერთო ჯამში ძაბვის საერთო მოგება მივიღეთ 76.8% ეფექტურობით (ცხრ.28).

ცხრილი 28. Arduino-ს მოდიფიცირებით მიღებული შედეგები

სტატუსი	LED ჩართული	LED გამორთული
ძირითადი UNO	55 mA	53 mA
გამორთული LED, USB, UART, Sleep	13.2 mA	12.3 mA

თავი 6_ის შედეგები

განიხილა და მოდიფიცირება განხორციელდა პრაქტიკულ ექსპერიმენტულ სამუშაო პლატფორმაზე, Arduino UNO. მოდიფიცირება განხორციელდა პლატფორმის ენერგო მოხმარების მინიმიზაციისა და სამუშაო სიცოცხლის ციკლის მაქსიმიზაციისათვის. საბოლოოდ მიღებულ იქნა ძაბვის საერთო მოგება 76.8% ეფექტურობით (ცხრ. 28).

დასკვნა

ექსპერიმენტი გვიჩვენებს რომ სენსორული კვანძის სასიცოცხლო დრო არ არის დამოკიდებული ცალსახად ენერჯის სარეზერვო ნაწილზე (ელემენტზე). სენსორის სასიცოცხლო დროი შესაძლებელია შეიზღუდოს სხვა შემადგენელი ნაწილებითაც როგორცაა პროგრამული და აპარატურული კომპონენტები. გაზომვები ენერგო მოხმარებასთან დაკავშირებით აღებულ იქნა Mica2-ის სენსორული პლატფორმიდან, ამ მეთოდში გადაცემისთვის გამოვიყენე GSP და CSMA მეთოდები.

ჩვენი შედეგები გვიჩვენებენ, რომ ენერჯის მოხმარება ერთი ბიტის გადაცემის დროს თითქმის ორჯერ აღემატება ენერჯის მოხმარებას ერთი ბიტის მიღებასთან შედარებით. მიღებული შედეგები დადებითია GSP პროტოკოლისათვის, რაც იმ ფაქტით შეიძლება აიხსნას, რომ GSP არ შეიცავს თავსართებს არც უშუალოდ პაკეტის ფორმატში და არც კონტროლ პაკეტის სტრუქტურებში.

ამ ნაშრომში განხილული გაზომვები სრულად არის შესაძლებელი გამოყენებულ იქნას რეალურ პირობებში და ასევე შესაძლებელია მისი კომერციულ წარმოებაში ჩაშვებაც რომელიც შემდგომში სენსორული ქსელების არქიტექტურაში ინტეგრირდება. განხორციელების პროცესი არ არის რთული და არ მოითხოვს დამატებითი ოპერაციებს გატარებას, ასევე არ საჭიროებს დამატებითი მომზადების ფაზებს და სპეციფიურს ოპერაციებს, კვანძის სამუშაო პროცესის დასრულების შემდეგაც. სიმარტივე ასევე იმაში ვლინდება, რომ სენსორული კვანძები არ მოითხოვენ დამატებით აპარატურულ დანამატს GSP მეთოდის განსახორციელებლად.

ასევე, ეს ნაშრომი გვიჩვენებს, რომ სპერიფიური პარამეტრების შემთხვევაში, როგორც მაგალითად ჩვენს სატესტო მონაცემებშია განხილული, სენსორული კვანძების სინქრონიზაციის ოპერაცია GSP მეთოდის შემთხვევაში არ მოითხოვება, რადგანაც ყველა პაკეტი ავტომატურად ცენტრალურ სადგურზე მიედინება. GSP მეთოდი არ მოიცავს კლასტერიზაციის ოპერაციას და არ გულისხმობს გარკვეული

სპეციფიური როლების მინიჭებას სენსორული კვანძებისთვის, რადგან ასეთი ფუნქციები გარკვეულ თავსართს უმატებენ გადასაცემი ინფორმაციის სამუშაო პროტოკოლს.

მიუხედავად იმისა, რომ ტესტირება ჩვენს შემთხვევაში განხორციელდა მხოლოდ ერთი ცენტრალური სადგური გამოყენებით, GSP მეთოდისთვის არ წარმოადგენს დაბრკოლებას თუ რამდენი ცენტრალური სადგური იქნება გამოყენებული სენსორულ ქსელში. სამომავლო სამუშაოები განხორციელდება რამოდენიმე ცენტრალური სადგურის გამოყენებითა და GSP-ს მოქმედებით ასეთი სცენარების შემთხვევაში.

ჩვენ ასევე შევხებით უსქ-ში გამოყენებულ გადაცემის ალტერნატიულ პროტოკოლს სახელწოდებით LEACH და მის ვარიაციებს, საბოლოოდ შედგენილია მისი გაუმჯობესებული ვარიანტი. ამისათვის გადაჭრილია ორი ამოცანა: პირველი - სწორი და ოპტიმალური კლასტერის მმართველი კვანძის შერჩევა, რაც მიღწეულია კლასტერის შერჩევის ზღვრის მოდიფიცირებით. მეორე, მოდიფიცირებულია პროტოკოლი ქსელში კვანძთაშორისი თანასწორობის მისაღწევად, რის შედეგადაც ქსელის თითოეული კვანძი თანაბარი ოპტიმალური დატვირთვით იმუშავებს. ასევე, მოდიფიცირება გაუკეთდა TDMA განრიგების ცხრილს და განზოგადდა იგი თითოეული სენსორული კვანძისათვის, რაც უზრუნველყოფს კვანძთაშორის თანასწორობას. ამ მეთოდების გაუმჯობესებით მიღწეულია უსქ-ში ენერგო რესურსის ოპტიმალური გადანაწილება. საბოლოოდ დადგენილია, რომ LEACH პროტოკოლის გაუმჯობესებული ვარიანტის გამოყენება მნიშვნელოვნად ზრდის უსქ-ის მუშაობის დროს.

Arduino UNO_ს პლატის მოდიფიცირებით ძაბვის რეგულატორის ჩანაცვლებით რაც წარმოადგენს გეომეტრიულ ცვლილებას, გამომდინარე იქიდან, რომ ძაბვის კონვერტაციის ცვალებადობა იზრდება, ასევე გასათვალისწინებელია, რომ ამ სახის ცვლილება არა-წრფივია. საერთო ჯამში ძაბვის საერთო მოგება მივიღეთ 76.8% ეფექტურობით.

განიხილა და მოდიფიცირება განხორციელდა პრაქტიკულ ექსპერიმენტულ სამუშაო პლატფორმაზე, Arduino UNO. მოდიფიცირება განხორციელდა პლატფორმის ენერგო მოხმარების მინიმიზაციისა და სამუშაო სივრცის დროის მაქსიმიზაციის მიზნით. საბოლოოდ მიღებულ იქნა ძაბვის საერთო მოგება 76.8% ეფექტურობით (ცხრ. 28).

გამოყენებული ლიტერატურა

1. Rajeswari S., and Venkataramani Dr. Y., "An Adaptive Energy Efficient and Reliable Gossip Routing Protocol For Mobile Ad Hoc Networks", IJCTE, 2010, Vol. 2, No. 5 pp. 1793-8201.
2. http://www.xbow.com/Support/Support_pdf_files/XBOW_Smart_Dust_ProductInfoGuide.pdf, [2021, 20 ივნისი].
3. Altaan A.S., Effects of sensor properties on power consumption in wireless sensor network. in Computer Research and Development, 2010 Second International Conference on, pp. 335–339, 7–10 May 2010
4. Mainetti L., Patrono L., Vilei A., Evolution of wireless sensor networks towards the Internet of Things: A survey. in Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM), 2011 19th International Conference on, pp. 1–6, 15–17 Sept 2011
5. Muller I., Netto J.C., Pereira C.E., WirelessHART field devices. IEEE Instrum. Meas. Mag. 14(6), 20–25 (2011).
6. CC1000 Radio IntM.nc, program into the communication stack of Crossbow Motes. V1, 29, april 26, 2004.
7. Crossbow Technology Inc. Wireless Sensor Networks, Getting Started Guide. Rev. B. Document: 7430-0022-05. August 2004.
8. Cnternational Journal of Electronics & Information Engineering. Vol. 8, No. 1 (Mar. 1, 2018)
9. ATMEL, "ATmega128 ATmega128L Summary". Rev:2467LA-AVR-05/04.
10. <http://mail.millennium.berkeley.edu/pipermail/tinyos-commits/2004-August/004891.html>. [2021, 20 იანვარი].
11. Maxrad, "Base Station Antennas MFB800 Mhz Omnis, Datasheets", PCTel Antenna Products Group Inc.
12. Eveready Battery Company, "Energizer Engineering Data for NH15 battery", Found on : <http://data.energizer.com/PDFs/nh15-1600mAh.pdf>. [2021, 20 იანვარი].

13. Duracell Ni-MH Rechargeable batteries. Online Documentation. Ni-MH Technical Bulletin, Chapter 5. Found on http://www.duracell.com/oem/Pdf/others/nimh_5.pdf. [2021, 20 ონჯვარო].
14. Digibattery, "NiMH Rechargeable Batteries: Rechargeable Battery FAQs", Found in http://www.digibattery.co.uk/ni-mh_store1.html. [2021, 20 ონჯვარო].
15. nesC 1.3 Language Reference Manual David Gay, Philip Levis, David Culler, Eric Brewer July 2009
16. Lu Ch., "Berkeley Motes and TinyOS", CS851 Presentation, September 5, 2015.
17. Reema Sandhu. "Attacks in Wireless Sensor Networks and Security Measures." IRACST – International Journal of Computer Networks and Wireless Communications (IJCNWC), ISSN: 2250-3501 Vol.6, No 2, Mar-Apr 2016 (n.d.): n. pag. Web.
18. K. Sohrabi et al., "Protocols for Self- Organization of a Wireless Sensor Network," IEEE Pers. Commun., Oct. 2016, pp. 16–27
19. Jin Y. and Tan H. P., "Optimal performance trade-offs in MAC for wireless sensor networks powered by heterogeneous ambient energy harvesting", in Proc. IEEE IFIP Networking Conf. IFIP Networking 2014, Trondheim, Norway, 2014.
20. Wah Chun Chan.(2002). Performance analysis of telecommunications and local area networks.New York: Kluwer Academic Publishers.(p.373-375), 2012, March 12.
21. Heinzelman W. R., Kulik J., and Balakrishnan H., "Adaptive Protocols for Information Dissemination in Wireless Sensor Networks," Proc. ACM MobiCom '99, Seattle, WA, 1999, pp. 174–85
22. Wuhib F., Dam M., and Stadler R., "A Gossiping Protocol for Detecting Global Threshold Crossings", IEEE Transactions on Network and Service Management, Vol. 7, No. 1, 2010 pp.1-16.
23. Hill J., Szewczyk R., Woo A., Hollar S., Culler D., Pister K.. "Architecture Directions for Networked Sensors", ASPLOSIX 11/00 Cambridge, MA, USA.

24. Heinzelman W. R., Chandrakasan A., and Balakrishnan H., "Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks" in IEEE Hawaii International Conference on Systems Sciences, 2000.
25. Ishikawa T., and Hayakawa T., "Gossip Protocol on the Ad Hoc Networks and Its Approximated Saturation", 49th IEEE Conference on Decision and Control, Hilton Atlanta Hotel, Atlanta, GA, USA, 2010, pp. 2638-2643.
26. Shnayder V., Hempstead M., Chen B., Werner Allen G., and Welsh M., "Simulating the Power Consumption of LargeScale Sensor Network Applications", SenSys'04, Baltimore, Maryland, USA, November 3–5, 2004.
27. Polastre J., Hill J., Culler D., "Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks", SenSys'04, Baltimore, Maryland, USA, November 3–5, 2004.
28. Nasir Khan M. and Jamil M., "Performance Improvement in Lifetime and Throughput of LEACH Protocol," Indian J. Sci. Technol., vol. 9, no. 21, Jun. 2016.
29. Khan M. N., Gilani S. O., Jamil M., Shahzad A., and Raza A., "Efficient energy utilization in wireless sensor networks: an algorithm," 3C Technol. Innov. Apl. Pyme, vol. 7, no. 4, Jan. 2019.
30. Raghunathan V., Schurgers C., Park S., Srivastava M. B., "Energy-Aware Wireless Microsensor Networks". IEEE Signal Processing Magazine, march 2002, pp40-50.
31. <http://www.stjude.org/glossary?searchTerm=S>. [2021, 20 ოანვარი].
32. Polastre J., "Sensor Network Media Access Design", Computer Science Division. EECS Department, University of California, Berkeley. (c) 2003 Regents of the University of California.
33. Shih E., Cho S., Ickes N., Min R., Sinha A., Wang A., Chandrakasan A., "Physical Layer Driven Protocol and Algorithm Design for Energy-Efficient Wireless Sensor Networks", ACM SIGMOBILE 7/01 Rome, Italy.
34. TinyOS tutorial, found on www.tinyos.net/tinyos-1.x/doc/tutorial/. [2021, 20 ოანვარი].
35. Blink application, source code in TinyOS distribution by Crossbow. Version 1.1

36. Ali, M.S., Dey, T., Biswas, R., 2008. ALEACH: Advanced LEACH routing protocol for wireless microsensor networks. ICECE 2008. International Conference on Electrical and Computer Engineering, pp. 909–914.
37. <http://dx.doi.org/10.1109/ICECE.2008.4769341>. [2021, 20 იანვარი].
38. Murali, V., 2016. Analysis of energy efficient, LEACH-based cooperative wireless sensor network. In: Satapathy, C.S., (Ed.). New Delhi, India: Springer.doi: 10.1007/978-81-322-2517-1_35
39. <https://doi.org/10.1109/TWC.2002.804190>. [2021, 20 იანვარი].
40. Long, Ji-Zhen, Chen, Yuan-Tao, Deng, Dong-Mei, Bin, L.I., Fang, L.I., 2011. Assistant cluster head clustering algorithm based on LEACH protocol. Comput. Eng. 37 (7), 103–132.
Url:<http://www.ecice06.com/EN/abstract/abstract20645.shtml>. [2021, 20 იანვარი].
41. <https://desertbot.io/blog/arduino-resource-guide> [2021, 20 იანვარი].
42. <https://www.arduino.cc/en/uploads/Main/Arduino Uno Rev3-schematic.pdf>. [2021, 20 იანვარი].
43. <https://www.onsemi.com/products/power-management/lido-regulators-linear-voltage-regulators/ncp1117>. [2021, 20 იანვარი].
44. <http://www.farnell.com/datasheets/2200606.pdf>. [2021, 20 იანვარი].
45. <https://learn.sparkfun.com/tutorials/installing-an-arduino-library>. [2021, 20 იანვარი].
46. ჯიჯურიძე დ. მობილური აპლიკაციები ენერგეტიკაში. მე-2 საერთაშორისო სამეცნიერო-ტექნიკური კონფერენციის - „ენერგეტიკის თანამედროვე პრობლემები და მათი გადაწყვეტის გზები“. „ენერჯია“, 2020, №4(96), II, გვ. 163-166.
47. Jijuridze D. Energy consumption minimization in wireless sensor networks according to modern approach. Интернаука, 2021, №13(189), Issue 2, pp. 77-80.
48. Джиджуридзе Д. Внедрение интернета вещей в беспроводных сенсорных сетях. Интернаука, 2021, №14(190), часть 1, стр. 19-23.
49. Джиджуридзе Д. Мобильные беспроводные сенсорные сети. Рассмотрение. Интернаука, 2021, №14(190), стр. 24-27.